

# **Technische Universität Dresden**

Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“

Institut für Wirtschaft und Verkehr

Professur für BWL, insb. Verkehrsbetriebslehre und Logistik

## **DIPLOMARBEIT**

### **Methoden und Kriterien zur Bewertung von Eisenbahninfrastruktur**

Freie wissenschaftliche Arbeit

zur Erlangung des Grades eines Diplom-Verkehrswirtschaftlers

Dresden, 6. Januar 2009

eingereicht von:

**Schönemann, René**

Matrikel-Nr.: 2933251

betreut von:

Prof. Dr. Knut Haase

Prof. Dr. Karsten Lemmer

Dipl.-Verk.wirtsch. Michael Klier

Dipl.-Ing.-Inf. Thomas Böhm

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Benedikt Scheier

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
Symbolverzeichnis	VII
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation . . . . .	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit & Vorgehensweise . . . . .	2
<b>2 Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1 Definition Leit- und Sicherungstechnik . . . . .	4
2.1.1 Technische Einrichtungen des Eisenbahnbetriebes . . . . .	5
2.1.2 Entwicklung der Leit- und Sicherungstechnik . . . . .	7
2.1.3 Aktueller Stand der Leit- und Sicherungstechnik . . . . .	9
2.2 Eisenbahn-Simulation und das RailML-Schema . . . . .	9
2.3 Wirtschaftlichkeit der LST . . . . .	11
2.3.1 Grundlagen der Nutzenbewertung . . . . .	13
2.3.2 Zielerreichungsgrade von Nutzenuntersuchungen . . . . .	14
2.3.3 Gewichtung & Entscheidungsfindung . . . . .	16
<b>3 Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen der Leit- und Sicherungstechnik</b>	<b>16</b>
3.1 Analyse der Lebenszykluskosten . . . . .	17
3.1.1 Kostengliederungsstruktur der Leit- und Sicherungstechnik . . . . .	18
3.1.2 Infrastrukturelemente der Leit- und Sicherungstechnik . . . . .	21
3.1.3 Ermittlung der Anschaffungs- und Rückbaukosten . . . . .	21
3.1.4 Berechnung der periodisierten Betriebskosten . . . . .	23
3.1.5 Instandhaltungsstrategien und -kosten . . . . .	23
3.1.6 Folgekosten und Betriebserschwerungskosten . . . . .	25
3.1.7 Kapitalkosten . . . . .	26
3.1.8 Einflüsse von EVU auf die Lebenszykluskosten . . . . .	27
3.2 Monetär bewertbarer Nutzen / Erlöse . . . . .	27

3.2.1	Erlöse des EIU . . . . .	28
3.2.2	Erlöse des EVU . . . . .	29
3.3	Quantitativ bewertbare Nutzenkriterien . . . . .	30
3.3.1	Leistungsfähigkeit und Leistungsverhalten . . . . .	30
3.3.2	Leistungsverhalten und Betriebsoptimum des EIU . . . . .	32
3.3.3	Auswirkungen der LST auf Verspätungen . . . . .	35
3.4	Qualitativ bewertbare Nutzenkriterien . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Anwendungsbeispiel für die erweiterte Wirtschaftlichkeitsanalyse</b>	<b>37</b>
4.1	Untersuchungsgegenstand . . . . .	37
4.2	Modellierung von Szenarien . . . . .	39
4.2.1	Variante 1: Zugmeldeverfahren ohne Streckenblock . . . . .	39
4.2.2	Variante 2: Signalisierter Zugleitbetrieb (SZB-E) . . . . .	40
4.2.3	Variante 3: Technisch unterstützter Zugleitbetrieb (TuZ) . . . . .	41
4.2.4	Variante 4: Zugmeldeverfahren mit elektronischem Stellwerk . . . . .	41
4.3	Kosten-Erlös-Rechnung . . . . .	41
4.3.1	Berechnung der Lebenszykluskosten . . . . .	41
4.3.2	Berechnung der Erlöse durch Trassenpreise . . . . .	43
4.4	Nutzwertanalyse . . . . .	50
4.4.1	Festlegen der Nutzenkriterien . . . . .	50
4.4.2	Berechnung & Gewichtung der Zielerreichungsgrade . . . . .	52
4.4.3	Nutzwertberechnung und Darstellung der Ergebnisse . . . . .	53
4.4.4	Entscheidungsfindung . . . . .	58
<b>5</b>	<b>Nutzung von Simulationsdaten in der Umlaufplanung</b>	<b>58</b>
5.1	Grundlagen der Umlaufplanung . . . . .	59
5.2	Modellierung mit Hilfe der linearen Optimierung . . . . .	60
5.2.1	Überführung in ein mathematisches Modell . . . . .	62
5.2.2	Umsetzung des Modells mit Hilfe von GAMS . . . . .	64
5.3	Anwendung an einem Beispiel . . . . .	65
5.4	Weiterführende Betrachtungen . . . . .	68
5.5	Ergänzender Hinweis zu den Beispielen . . . . .	69
<b>6</b>	<b>Fazit zur erweiterten Wirtschaftlichkeitsanalyse</b>	<b>69</b>

<b>7 Zusammenfassung &amp; Ausblick</b>	<b>72</b>
<b>Anhang</b>	<b>IX</b>
<b>Literatur</b>	<b>XXVIII</b>



# Abbildungsverzeichnis

1	Übersicht Leit- und Sicherungstechnik . . . . .	5
2	Systemeigenschaften und Schutzfunktionen der Sicherungstechnik . .	7
3	Wirkungsweise Streckenblock . . . . .	8
4	Ursache-Wirkung-Kette . . . . .	12
5	Arten von Ergebnisgrößen . . . . .	13
6	Einflussgrößen der Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen . . . . .	17
7	Lebenszyklus-Phasen . . . . .	18
8	Kostengliederungsstruktur der Lebenszykluskosten . . . . .	19
9	Betriebserschwerungskosten . . . . .	25
10	Wartezeitfunktion . . . . .	32
11	Finden des Betriebsoptimums . . . . .	34
12	Topologie des Streckenbeispiels . . . . .	38
13	Streckentopologie in den Varianten SZB-E und TuZ . . . . .	40
14	Auswertung der Anschaffungs- und Besitzkosten . . . . .	44
15	Betriebsoptimum im Szenario MSTW . . . . .	46
16	Betriebsoptimum im Szenario SZB-E . . . . .	47
17	Betriebsoptimum im Szenario TuZ . . . . .	47
18	Betriebsoptimum im Szenario ESTW . . . . .	48
19	Kapitalwerte im Vergleich . . . . .	49
20	Planungsschritte in ÖV-Systemen . . . . .	59
21	Struktogramm des Modells zur Umlaufplanung . . . . .	63
22	Berücksichtigung von Verstärkerfahrten . . . . .	68
23	Anwendungsfalldiagramm . . . . .	71
24	Ergebnisse der Umlaufplanung Beispiel 1 . . . . .	XIX
25	Ergebnisse der Umlaufplanung Beispiel 2 . . . . .	XX
26	Ergebnisse der Umlaufplanung Beispiel 3 . . . . .	XXI
27	Ergebnisse der Umlaufplanung nach Modifikation . . . . .	XXVII

## Tabellenverzeichnis

1	Zielerreichungsgrade . . . . .	15
2	Quantitativ bewertbare Nutzenkriterien . . . . .	31
3	Qualitativ bewertbare Nutzenkriterien . . . . .	36
4	Erforderliche Infrastrukturelemente . . . . .	42
5	Gegenüberstellung der Lebenszykluskosten . . . . .	43
6	Zahl der Zugtrassen je Betriebstag . . . . .	45
7	Erlöse pro Tag in Abhängigkeit vom Fahrplan . . . . .	48
8	Ergebnisgrößen der Nutzwertanalyse . . . . .	51
9	Entscheidungsübersicht 1 . . . . .	54
10	Entscheidungsübersicht 2 . . . . .	57
11	Eigenschaften der Fahrten im Streckenbeispiel . . . . .	66

## Abkürzungsverzeichnis

AK	Anschaffungskosten
ASE	Anschlusseinheiten
BEK	Betriebserschwerungskosten
BK	Betriebskosten
DB AG	Deutsche Bahn AG
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EIU	Eisenbahninfrastrukturunternehmen
EMSTW	Elektromechanisches Stellwerk
ESTW	Elektronisches Stellwerk
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
GAMS	General Algebraic Modeling System
IK	Installationskosten
KIHK	korrektive Instandhaltungskosten
LEU	Lineside Electronic Unit
LST	Leit- und Sicherungstechnik
LZB	Linienförmige Zugbeeinflussung
MSTW	Mechanisches Stellwerk
ND	Nutzungsdauer
PIHK	präventive Instandhaltungskosten
PK	Planungskosten
PZB	Punktförmige Zugbeeinflussung
RBC	Radio Block Center
RBK	Rückbaukosten
RSTW	Relais-Stellwerk
SPNV	spurgeführter Personennahverkehr
STE	Stelleinheiten

## Symbolverzeichnis

### Kapitel 2

$B_x$	Barwert
$fz_x$	Zielerreichungsgrad

### Kapitel 3

$\delta_i$	Instandhaltungsdauer
$d_{i,j}$	jährliche Betriebsdauer
$G_i$	Grundpreis pro Trassenkilometer
$i$	Laufparameter Infrastrukturelemente
$j$	Laufparameter Mitarbeiter
$k$	Laufparameter Verbrauchsmaterialien
$l_i$	Streckenlänge von $i$
$L_i$	Zugtyp abhängig vom Gewicht
$m_{i,k}$	Kosten Verbrauchsmaterialien $k$
$\mu_{i,k}$	jährliche Einsatzmenge Verbrauchsmaterialien
$n_i$	Anzahl Instandhaltungen pro Jahr
$p_{i,j}$	Stundenlohn des Mitarbeiters $j$
$P_i$	Produktfaktor pro Trassenkilometer
$R_i$	Regionalfaktor
$S_i$	Anreizsystem zur Verringerung von Störungen
$t$	Periode
$TE_{AB}$	Trassenentgelt auf der Relation AB
$z$	Zinssatz

### Kapitel 4

$\Delta$	Verhältniszahl
$NW_{ges}$	Gesamtnutzwert
$v$	Geschwindigkeit

**Kapitel 5**

$ab_i$	Abfahrtzeit von Linienfahrt $i$
$c_v$	Kosten einer Linienfahrt in der Variante $v$
$es_i$	Endstation von Linienfahrt $i$
$fz_v$	Fahrzeit in der Variante $v$
$I$	Menge der Linienfahrten
$lfc_{s,s,v}$	Kosten einer Leerfahrt von Station zu Station in Variante $v$
$lfz_{s,s,v}$	Fahrzeit einer Leerfahrt von Station zu Station in Variante $v$
$N_i$	Menge der Linienfahrten, die mit der Fahrt $i$ kompatibel sind (Nachfolger von $i$ )
$S$	Menge der Stationen
$ss_i$	Startstation von Linienfahrt $i$
$uk_v$	Fixkosten, die pro Umlauf in der Variante $v$ anfallen
$V$	Menge der Infrastruktur-Varianten

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

Die europäischen Eisenbahnen unterliegen derzeit einem Veränderungsprozess — dem schrittweisen Wandel der staatlichen Betriebe in privatrechtliche Unternehmen. Dieser wird sich auch in den kommenden Jahren fortsetzen. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Forderung nach mehr wirtschaftlichem Handeln im Gesamtsystem Eisenbahn.

Vor allem die Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) stehen hier vor einer besonderen Aufgabe. Zum Einen sollen sie den Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) eine stabile und zuverlässige Grundlage zur Durchführung von Verkehrsdienstleistungen anbieten. Im Interesse der EVU und um das System Eisenbahn im intermodalen Vergleich wettbewerbsfähig zu machen, soll die Bereitstellung der Trassen so preiswert wie möglich erfolgen. Zum Anderen sind Investitionen in die Infrastruktur erforderlich und längst überfällig. Der seit vielen Jahren aufgebaute Investitionsstau im Eisenbahnnetz, hervorgerufen unter anderem durch die Fokussierung des Ausbaus von Hochgeschwindigkeits- und Fernverkehrsstrecken, soll reduziert werden. Als wirtschaftlich arbeitendes Unternehmen muss sich das EIU die Frage stellen, ob und in welchem Umfang Investitionen (auch Instandhaltungs- und Ersatzinvestitionen) sinnvoll sind.

Da Eisenbahninfrastruktur ein sehr langlebiges Gut ist, wird dem Anlagenmanagement (insbesondere der Instandhaltung) eine hohe Bedeutung zugeschrieben [vgl. VEIT 2007, S. 873]. In der Planungsphase werden die Kosten für die gesamte Lebensdauer festgelegt. Veränderungen innerhalb der Lebensdauer sind quasi unmöglich, da eine vorzeitige Umbaumaßnahme zwar zu Kostenoptimierung führen kann, aber auch eine Vergeudung von Ressourcen bedeutet.

Nach [LIENAU 2007, S. 1ff] ist das bisherige Verfahren bei Planungen zur Anpassung der Infrastruktur sehr zeit- und kostenintensiv. Aufbauend auf einer Verkehrsnachfrageuntersuchung wird versucht, eine oder mehrere Infrastrukturvarianten zu finden, für welche dann die Kosten ermittelt sowie betriebs- und volkswirtschaftliche Untersuchungen durchgeführt werden. Ist das Ergebnis nicht zufriedenstellend, wird

das Verfahren iterativ wiederholt. An diesem Verfahren sind in der Regel mehrere Mitarbeiter beteiligt.

Zur Senkung des Planungszeit- und Personalbedarfs soll daher eine Lösung gefunden werden, die es ermöglicht, Schritte in der Planung zu vereinfachen und zusammenzufassen. Vor allem kleinere Eisenbahngesellschaften, die oftmals Eisenbahninfrastruktur- und -verkehrsunternehmen gleichzeitig sind, verfügen momentan nicht über eine effiziente Möglichkeit zur schnellen Kalkulation von Kosten des Eisenbahnbetriebes.

Ein Ansatz liegt in der Verknüpfung einer Planungs- und Simulationssoftware mit einer Software zur Durchführung betriebswirtschaftlicher Untersuchungen. Wurde auf Basis einer Verkehrsnachfrageuntersuchung beschlossen, eine Infrastrukturmaßnahme zu planen, erfolgen zunächst Simulationen zur Leistungsfähigkeit von verschiedenen Infrastrukturvarianten in der Planungs- und Simulationssoftware. Über eine definierte Schnittstelle sollen die dort eingegebenen Infrastrukturdaten an eine Betriebswirtschaftssoftware übergeben werden. Darin sollen dann Lebenszykluskosten und andere Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen schnell und einfach möglich sein. Die Bearbeitung dieser Aufgabe erfolgt idealerweise durch nur einen Mitarbeiter.

## **1.2 Zielsetzung der Arbeit & Vorgehensweise**

Zur Realisierung des genannten Lösungsansatzes wurde am Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) die Projektgruppe Life-Cycle-Management gegründet. Deren Ziel ist die Entwicklung eines Tools zur durchgängig softwaregestützten erweiterten Wirtschaftlichkeitsanalyse (EWA) für Eisenbahnunternehmen. Damit soll es möglich werden, Lebenszykluskosten und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen direkt aus einer Eisenbahnbetriebssimulation abzuleiten und somit die Rentabilität einer Investition im Vorfeld abschätzen zu können.

Am DLR wurden bereits Anstrengungen unternommen, ein Software-Tool zur Berechnung von Lebenszykluskosten der Eisenbahninfrastruktur auf Basis von Microsoft Excel zu erstellen. [BECK 2007] Dieses erwies sich jedoch als unflexibel und nicht leistungsfähig genug. Das neue System soll datenbankgestützt sein, um jedes Infrastrukturelement einzeln beurteilen zu können. Im Excel-Tool werden Infrastrukturele-

mente gleichen Typs zusammengefasst, was nur eine überschlägige, durchschnittliche Bewertung zulässt.

Das momentan in der Entwicklung befindliche Tool wird in der vorliegenden Arbeit als EWA-Tool bezeichnet. Es soll sowohl von Eisenbahninfrastruktur- als auch von Eisenbahnverkehrsunternehmen zur Durchführung erweiterter Wirtschaftlichkeitsanalysen eingesetzt werden können. In Abhängigkeit vom Anwender sind relevante Fragen zu beantworten:

Für EIU:	Bewertung, richtige Dimensionierung und Auslastung der Infrastruktur, Betrachtung des Fahrbetriebes, um die Belange der EVU nachvollziehen zu können,
Für EVU:	Betrachtung des Fahrbetriebes zur optimalen Auslastung der Fahrzeuge, Mögliche Rückschlüsse auf Angebotsqualität gegenüber Bahnkunden, Zusammenspiel Fahrzeug $\leftrightarrow$ Infrastruktur (Kompatibilität),
Für Entscheider:	Betrachtung des Gesamtsystems, beispielsweise für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von regionalen Nebenstrecken und damit verbundenen Subventionen

Die vorliegende Diplomarbeit stellt die betriebswirtschaftliche Grundlage für die Entwicklung des Software-Tools dar. Es wird untersucht, welche Daten aus der mikroskopischen Eisenbahnbetriebssimulation gewonnen und inwiefern diese für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen verwendet werden können. Aufbauend auf der Betrachtung der reinen Lebenszykluskosten werden Methoden der Nutzenbewertung angewendet und auf ihre Eignung zur Bewertung von Eisenbahninfrastruktur untersucht. Da die Möglichkeiten hier sehr vielfältig sind, wird die Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit auf die Leit- und Sicherungstechnik (LST) beschränkt.

In einem weiteren Schritt wird untersucht, welchen Einfluss eine bestimmte LST auf die Produktionsprozesse der Eisenbahnverkehrsunternehmen hat. Dazu wird das



vom Lehrstuhl bekannte Modell zur Umlaufplanung erweitert und an die Besonderheiten des schienengebundenen Verkehrs angepasst. Nach dessen Umsetzung in die Modellierungssoftware GAMS werden entsprechende Untersuchungen durchgeführt.

Die Erkenntnisse werden mittels einer Beispieluntersuchung überprüft. Nach der abschließenden Zusammenführung der Ergebnisse aus Lebenszykluskostenberechnung und Nutzwertanalyse werden diese zur Entscheidungsfindung dargestellt.

## 2 Grundlagen

Die zu entwickelnde Software soll dem Management eines Eisenbahninfrastrukturunternehmens als Entscheidungshilfe bei Neu- und Ersatzinvestitionen in Leit- und Sicherungstechnik dienen. Ob eine Investition zweckmäßig ist, kann mittels verschiedener Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen überprüft werden. Deren Ergebnis hängt maßgeblich von den Kriterien ab, die dabei betrachtet werden. Welche Kriterien zur Bewertung herangezogen werden sollen, bestimmt der Fachplaner. Da dieser Entscheidungsprozess subjektiv erfolgen muss, wird zunächst geklärt, was unter dem Begriff Leit- und Sicherungstechnik zu verstehen ist und welche Kriterien zur Nutzenbewertung sich daraus ableiten lassen.

### 2.1 Definition Leit- und Sicherungstechnik

Für die Leit- und Sicherungstechnik existiert bisher keine allgemeine Definition. Im Eisenbahnwesen ist darunter ein Teil der Eisenbahninfrastruktur zu verstehen, der zur Sicherung, Automatisierung und Optimierung der Betriebsführung dient. Er wird vom Eisenbahninfrastrukturunternehmen organisiert und betrieben. Die Sicherung kann grundsätzlich technisch und nicht-technisch, zum Beispiel durch betriebliche Vorschriften erfolgen. Je größer das Gefährdungspotential (z.B. hohe Geschwindigkeiten) ist, desto höher ist auch der Anteil der technischen Sicherung.

Welche technischen Einrichtungen die Leit- und Sicherungstechnik determinieren, ist in Abbildung 1 dargestellt. Erläuterungen zu den einzelnen Elementen dieser Abbildung folgen in Abschnitt 2.1.1.

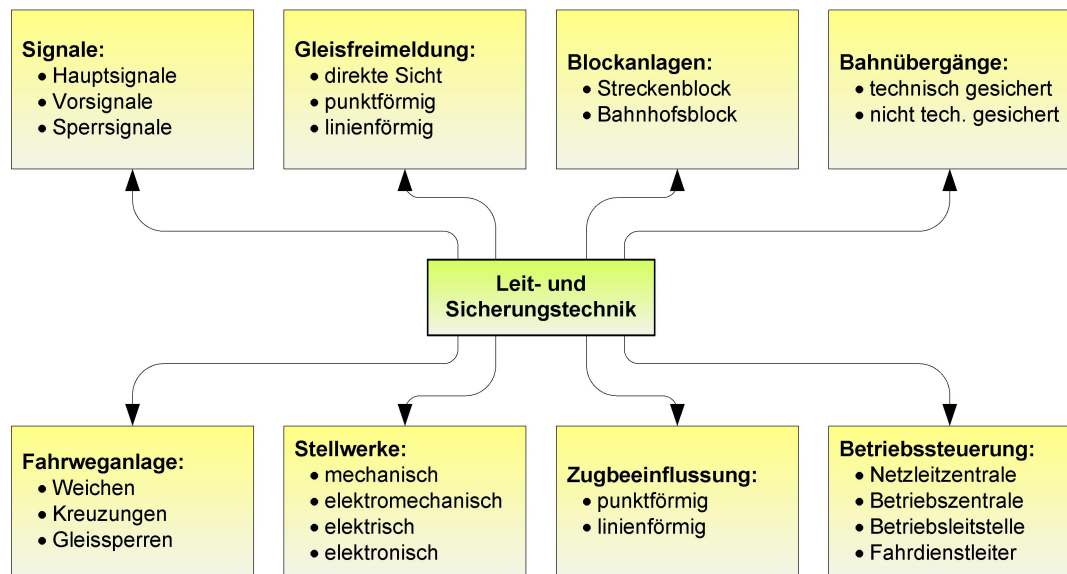


Abbildung 1: Übersicht über Bestandteile der Leit- und Sicherungstechnik nach [SCHLENDER 2007]

### 2.1.1 Technische Einrichtungen des Eisenbahnbetriebes

Der Schienenverkehr besitzt zwei Eigenschaften, die ihn, wie [MASCHEK 2007] beschreibt, maßgeblich prägen und somit von anderen Verkehrsträgern, vor allem vom Straßenverkehr, unterscheiden:

- geringe Haftreibung und dadurch lange Bremswege
- Spurführung

Die geringe Haftreibung erfordert eine besondere Sicherung des Fahrtbetriebes. Zur Bewältigung dieser Aufgabe gibt es verschiedene Einrichtungen<sup>1</sup>. Bezugnehmend auf Abbildung 1 fallen darunter:

1. Der „Flanken-, Folge- und Gegenfahrerschutz“ dient dem Schutz der Schienenfahrzeuge vor Kollisionen untereinander. Hierfür stehen folgende technische Einrichtungen zur Verfügung:

- (a) **Signale:** Übermitteln Fahrerlaubnisse oder -verbote von der Betriebssteuerung an den Fahrzeugführer

<sup>1</sup>Die technischen Einrichtungen der LST sind an dieser Stelle nur kurz skizziert. Im Anhang B sind genaue Definitionen aller Elemente zu finden.

- (b) **Gleisfreimelder:** Sicherungsanlage zum Feststellen, ob ein Gleisabschnitt frei von Fahrzeugen ist, technisch realisiert durch Achszähler und Gleisstromkreis
- (c) **Blockanlagen**<sup>2</sup>: Sicherungsanlage zur Wahrung des räumlichen Abstands zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zugfahrten

- 2. Der „Schutz an niveaugleichen Kreuzungen“ (**Bahnübergänge**) dient der Vermeidung von Kollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern.

Als Spurführung wird der physikalische Lauf des Fahrweges<sup>3</sup> bezeichnet [vgl. MASCHEK 2007, S. 599]. Durch fehlerhafte Einstellungen des Fahrweges oder zu hohe Geschwindigkeiten können unter anderem Entgleisungen verursacht werden. Zu den technischen Einrichtungen der Spurführung zählen:

- 1. Elemente der **Fahrweganlagen**:

- (a) Weiche: Verzweigung von Fahrwegen
- (b) Kreuzung: Höhengleiche Kreuzung von Gleisen
- (c) Gleissperre: Hindert Züge gewaltsam am Überfahren von Signalen

- 2. Zur zentralen Steuerung von Signalen, Weichen und anderen beweglichen Elementen des Fahrweges werden **Stellwerke** eingesetzt. Je nach Bauform können diese mechanisch, elektrisch, elektromechanisch oder elektronisch aufgebaut sein.

- 3. Die Überwachung der Geschwindigkeit wird durch das System der **Zugbeeinflussung** gewährleistet. Technische Einrichtungen zwingen die Schienenfahrzeuge an Gefahrenpunkten, z.B. vor Weichen, zum abbremsen, wenn der Triebfahrzeugführer dies nicht rechtzeitig tut. Man unterscheidet hier:

- (a) punktförmige Zugbeeinflussung: Datenübermittlung zwischen Zug und Strecke erfolgt nur an diskreten Punkten
- (b) linienförmige Zugbeeinflussung: Datenübermittlung zwischen Zug und Strecke erfolgt kontinuierlich

---

<sup>2</sup>Beim Fahren im festen Raumabstand ist das Streckennetz in feste Abschnitte, sogenannte Blöcke, unterteilt, siehe auch Kap. 2.1.2

<sup>3</sup>Fahrmöglichkeit eines Schienenfahrzeugs, abhängig von der Lage der Gleise und Weichen

4. Zur Regelung und Sicherung der Zug- und Rangierfahrten dienen die Einrichtungen der **Betriebssteuerung**. Dort werden die Disposition in mehreren Hierarchiestufen und die Fahrdienstleitung organisiert.

Auf eine genauere Beschreibung aller Sicherungselemente wird an dieser Stelle verzichtet. Es sei auf entsprechende Fachliteratur verwiesen. Eine gute Übersicht bietet zum Beispiel [PACHL 2004]. Abbildung 2 fasst die Systemeigenschaften und deren Realisierung in der Leit- und Sicherungstechnik noch einmal übersichtlich zusammen.

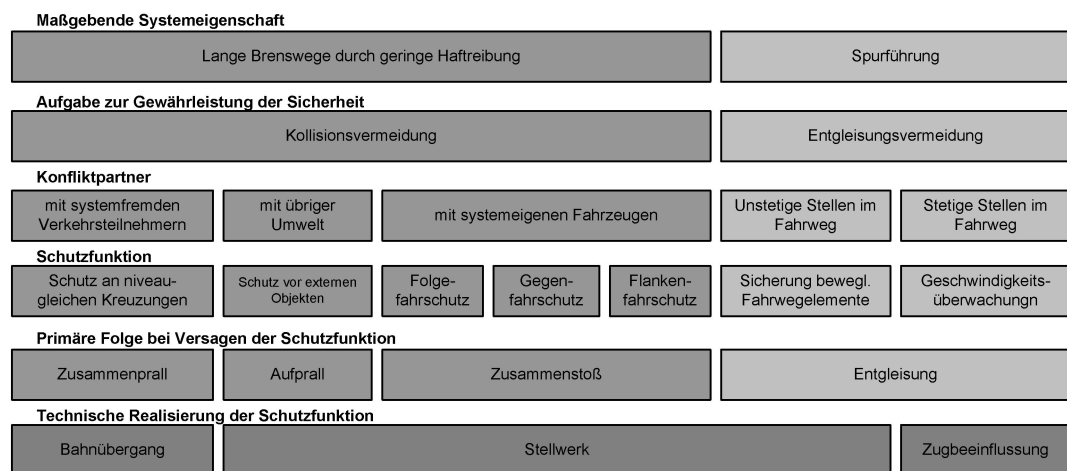


Abbildung 2: Maßgebende Systemeigenschaften und daraus resultierende Schutzfunktionen der Sicherungstechnik, Quelle: [MASCHEK 2007, S. 600]

### 2.1.2 Entwicklung der Leit- und Sicherungstechnik

Mit dem Aufkommen der ersten Eisenbahnen im 19. Jahrhundert existierte noch keine Infrastruktur zur Sicherung von Zugfahrten. Die Fahrzeugführer fuhren „auf Sicht“, d.h. sie orientierten sich ohne technische Hilfsmittel, ausschließlich an Geschehnissen auf der Strecke vor dem Zug. Da oft jeweils nur ein Zug auf einer eingleisigen Strecke verkehrte, war dies völlig ausreichend. Mit steigendem Verkehrsaufkommen nahm die Zahl der Züge pro Strecke zu. Auf Grund der in Kapitel 2.1.1 beschriebenen Besonderheiten des schienengebundenen Verkehrs eignete sich das Fahren auf Sicht jedoch nur bedingt für den Regelbetrieb und wenn, dann nur bei geringen Geschwindigkeiten. Heutzutage ist es nur noch im Rangierbetrieb, in Störungssituationen und auf Strecken mit geringer Bedeutung zugelassen.

Nach vielen schweren Unfällen war es folglich notwendig, Möglichkeiten zu finden, die die Zugfolge regeln und Zusammenstöße vermeiden. Eine erste Möglichkeit

war das **Fahren im Zeitabstand**. Hierbei wird ein fester Fahrplan mit ausreichend großen Pufferzeiten zwischen zwei Zugfahrten vorgegeben. Ungeplante Sonderfahrten, Verspätungen und technische Störungen bergen aber auch hier die Gefahr von Unfällen.

Wesentlich mehr Sicherheit versprach das **Fahren im festen Raumabstand**, bei dem die Führung der Züge durch Signale erfolgt. Die Eisenbahnstrecken werden dabei in sogenannte Blockabschnitte unterteilt, in denen sich jeweils nur ein Zug befinden darf. Jeder Blockabschnitt wird durch eine Signaleinrichtung geschützt. Erst wenn der Blockabschnitt vollständig frei ist, ermöglicht das ihm vorangestellte Signal die Einfahrt des nächsten Zuges. Auf die vollständige Beschreibung des Prinzips des Streckenblocks soll auf Grund seiner Komplexität hier verzichtet werden. Abbildung 3 stellt das Prinzip noch einmal grafisch dar.

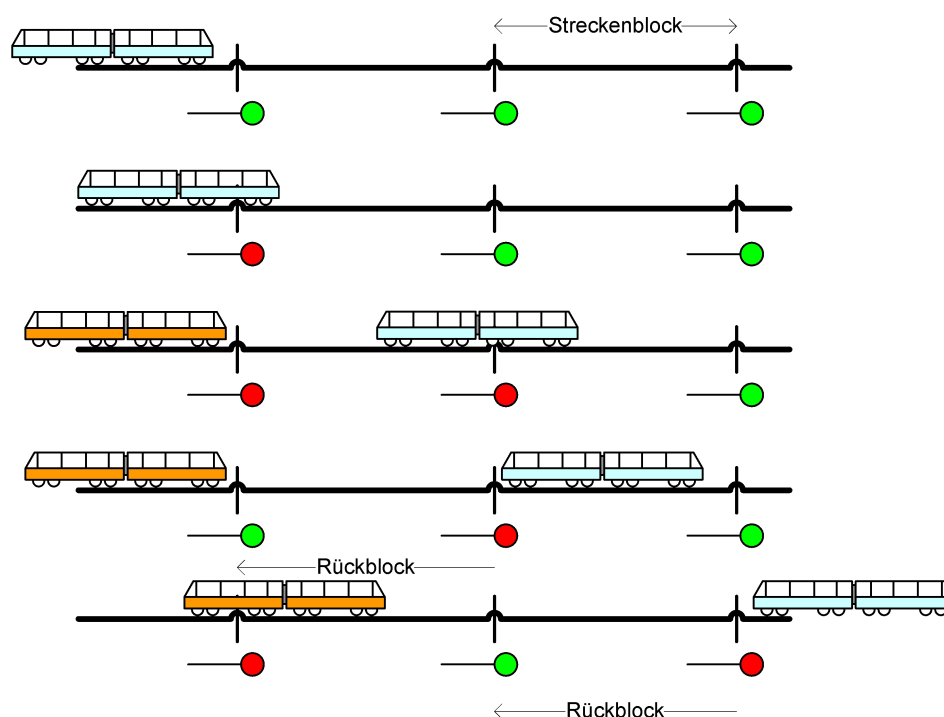


Abbildung 3: Wirkungsweise Streckenblock

Die Kapazität einer Strecke steigt mit der Anzahl der Blockabschnitte.

### 2.1.3 Aktueller Stand der Leit- und Sicherungstechnik

Das Fahren im festen Raumabstand wurde mit Fortschreiten der Technik weiterentwickelt. Wurde die Information über die Belegung einer Strecke zunächst durch Augenschein geprüft und fernmündlich zwischen zwei Stationen übertragen, so geschieht dies bei modernen Systemen mittels technischer Einrichtungen, z.B. durch Achszählgeräte, die entsprechenden Informationen elektronisch an Kontrolleinrichtungen weiterleiten.

Die Entwicklung ist mittlerweile so weit fortgeschritten, dass auf die Ausrüstung von Strecken mit ortsfesten Signalen verzichtet werden kann<sup>4</sup>. Die notwendigen Informationen werden dem Fahrzeugführer von der Streckenzentrale direkt ins Cockpit übertragen. Außerdem kann der Zug Informationen, z.B. seine aktuelle Position, an die Zentrale zurücksenden. Die Übertragung erfolgt über Eurobalisen<sup>5</sup> und GSM-R<sup>6</sup>. Insbesondere im Hochgeschwindigkeitsverkehr und im Rahmen der Vereinheitlichung der Bahnsysteme in Europa ist dieses Verfahren interessant und stellt den aktuellen Stand der Entwicklung dar.

## 2.2 Eisenbahn-Simulation und das RailML-Schema

Es gibt eine Reihe von Softwareprodukten, die helfen sollen, verschiedene Planungsaufgaben im Eisenbahnbereich zu lösen. Die Palette beginnt bei einfachen Systemen zur Erstellung von Gleisplänen, die hauptsächlich im Modellbahnbereich Anwendung finden. Darüber hinaus gibt es Software, die praxisnah eingesetzt wird, wie etwa das Fahrplanbearbeitungssystem FBS<sup>7</sup> zur Erstellung von Fahrplänen. So setzt die DB AG in Teilbereichen unter anderem speziell angepasste Software der PTV AG<sup>8</sup> ein.

---

<sup>4</sup>beim European Train Control System (ETCS), Level 2 und 3, Teil des europäischen Eisenbahnverkehrsleitsystems (ERTMS), vgl. [RAILXPERTS 2008]

<sup>5</sup>kontaktfreies Übertragungssystem für Daten zwischen Eisenbahnfahrzeugen und der Streckenausrüstung

<sup>6</sup>Global System for Mobile Communications - Rail: GSM-basierten Mobilfunksystem, für die Verwendung bei Eisenbahnen angepasst

<sup>7</sup>Fahrplanbearbeitungssystem FBS: Institut für Regional- und Fernverkehrsplanung, 04420 Frankenheim

<sup>8</sup>PTV AG: PTV Planung Transport Verkehr AG, 76131 Karlsruhe

Für die komplexe Simulation von Betriebsabläufen in Eisenbahnnetzen bietet der Markt außerdem Software wie RailSys von RMCon<sup>9</sup> oder OpenTrack des Instituts für Verkehrsplanung und Transportsysteme der ETH Zürich<sup>10</sup>. Damit ist es möglich, Eisenbahnnetze virtuell aufzubauen und umfassende Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von Eisenbahnstrecken durchzuführen. Die Modellierung erfolgt in einer dreistufigen Vorgehensweise:

1. Das Streckennetz wird metergenau abgebildet, d.h. Knoten und Kanten werden definiert, Fahrwegelemente, Stellwerke, Sicherungsanlagen und Betriebsstellen eingerichtet.
2. Triebfahrzeuge und Waggonen werden definiert und zu Zügen zusammengestellt. Für diese Züge können nun Umläufe erstellt werden. Die Simulationssoftware erstellt dazu den Fahrplan.
3. Die Simulation des Fahrbetriebes erfolgt, d.h. alle Fahrten eines definierten Zeitabschnittes laufen im Zeitraffer ab. So werden Konflikte im Fahrplan deutlich, Engpässe aufgezeigt und auch Möglichkeiten zur Verbesserung ersichtlich. Der Bearbeiter hat nun Gelegenheit, das Modell zu verändern und lässt die Simulation anschließend erneut ablaufen.

Ein großes Problem dieser Anwendungen ist die unzureichende Implementierung von Datenim- und -exportschnittstellen. Somit ist es schwierig, gewonnene Ergebnisse zwischen Anwendungen auszutauschen und weiterzuverarbeiten. Zur Vermeidung zeitaufwändiger Mehrfacherfassung und Redundanz von Daten wurde 2001 die RailML-Initiative gegründet. Teams verschiedener Interessengruppen<sup>11</sup> erarbeiten dabei einen einheitlichen Standard, um Datenaustausch und Verknüpfungen zwischen mehreren Softwareprodukten zu vereinfachen.

RailML basiert auf einem XML-Schema<sup>12</sup>. Dabei kann eine RailML-Datei aus mehreren Unterschemen bestehen. Es wurden drei Hauptbereiche (Infrastructure,

---

<sup>9</sup>RMCon: Rail Management Consultants GmbH, 30163 Hannover

<sup>10</sup>ETH Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

<sup>11</sup>Die RailML-Initiative wurde vom Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI Dresden und der ETH Zürich in Leben gerufen. Sie wird mittlerweile unter anderem von Eisenbahnunternehmen, Softwareherstellern und wissenschaftlichen Einrichtungen unterstützt.

<sup>12</sup>XML: Extensible Markup Language; dient der Darstellung hierarchisch strukturierter Daten in Textform

Rolling Stock und Time Table) festgelegt. Mit Hilfe dieses Schemas ist es möglich, sämtliche Elemente des Eisenbahnbetriebes und deren Eigenschaften zu beschreiben.

Die derzeit in der Entwicklung befindliche Software (Arbeitstitel EWA-Tool) nutzt das RailML-Schema zum Import von Daten, die für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen relevant sind. Damit ist es unabhängig von der vorgeschalteten Software zur Eisenbahnbetriebssimulation.

## 2.3 Wirtschaftlichkeit der LST

Aus den Erläuterungen im Abschnitt 2.1.3 wird bereits deutlich, welche Entscheidungen bei der Ausrüstung einer Eisenbahnstrecke mit Leit- und Sicherungstechnik berücksichtigt werden müssen. Es stellt sich die Frage, welche Technologie in welchem Umfang für welchen Zweck mindestens erforderlich bzw. maximal notwendig ist. Weder darf die verwendete Technologie mit dem Verkehrsaufkommen auf einer Strecke überfordert sein, noch sollen Investitionsmittel vergeudet oder sogar ein wirtschaftlicher Betrieb unmöglich werden. „Obwohl die Leit- und Sicherungstechnik nur einen relativ geringen Anteil bezogen auf die gesamte Investitionsvolumina der Bahn ausmacht, ist sie erfolgskritisch für die Durchführung eines sicheren, wirtschaftlichen und attraktiven Verkehrs.“ [LEIBBRAND 2007]

Neben diesen Gedanken zur Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit einer Strecke hat die Ausrüstung mit einer bestimmten Technologie Auswirkungen auf viele andere Bereiche des Eisenbahnbetriebes, u.a. auf:

- **Störungsmanagement:** Möglichkeit, bei Störungen schnell zu reagieren, Abbau von Verspätungen.
- **Wartung und Instandhaltung:** Wartungszyklen, Wartungsdauer und damit verbundene Betriebs- und Personalkosten variieren stark.
- **Eisenbahnverkehrsunternehmen:** Die technische Ausrüstung der Strecke erfordert eine entsprechende Ausrüstung der Fahrzeuge.

Die Beeinflussung des Eisenbahnbetriebes durch die Leit- und Sicherungstechnik ist sehr weitreichend und komplex. Um einen ersten Überblick zu schaffen, welchen



Einfluss die Komponenten der Leit- und Sicherungstechnik auf die Bereiche des Eisenbahnbetriebes haben, sind die Abhängigkeiten in einer Ursache-Wirkungs-Kette in Abbildung 4 schematisch dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist diese Abbildung stark verkleinert. Eine größere Darstellung ist noch einmal in Anhang A zu finden.

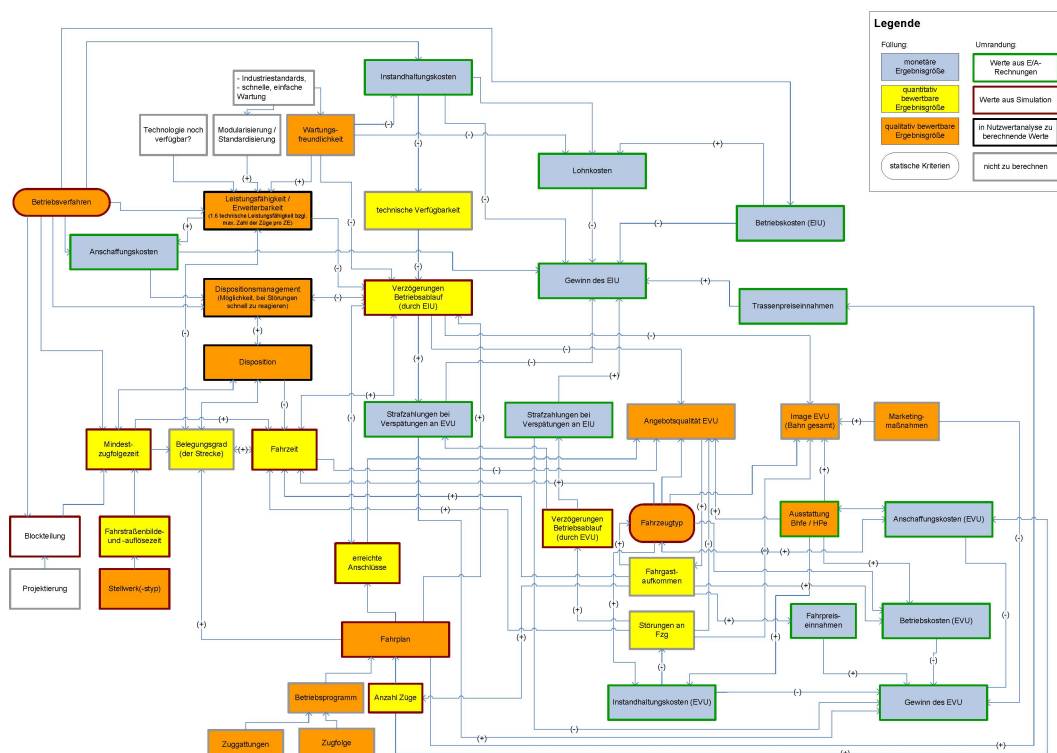


Abbildung 4: Ursache-Wirkung-Kette der Leit- und Sicherungstechnik

Die Abbildung ist wie folgt zu verstehen: Ausgehend von einem beliebigen Element kann sich der Betrachter dessen Auswirkungen auf andere Elemente verdeutlichen. Stellt man sich die Erhöhung des Wertes eines Elements vor, so können ausgehende Pfeile zu benachbarten Elementen verfolgt werden. Die Pfeilbewertung (Plus- oder Minuszeichen auf dem Pfeil) gibt die Richtung der Wertänderung an. Soll eine Verringerung eines Wertes angenommen werden, so ist die Pfeilbewertung zu negieren.

**Beispiel:** Die Verzögerungen im Betriebsablauf verursacht durch das EIU steigen. Dadurch sinkt die Angebotsqualität. Gleichzeitig sind höhere Entschädigungen (Strafzahlungen) an betroffene EVU zu zahlen.

Es wird deutlich, dass die Beurteilung von Leit- und Sicherungstechnik nicht durch einfache Einnahmen-Ausgaben-Rechnung erfolgen kann. Viele Kriterien, wie Angebotsqualität, Flexibilität im laufenden Betrieb usw., sind quantitativ nicht be-

wertbar, haben aber dennoch Anteil an der Bewertung von Infrastruktur. Im Folgenden sollen nun Kerngedanken von Nutzenuntersuchungen erörtert werden. Anschließend erfolgt die Prüfung ihrer Anwendbarkeit auf den Eisenbahnbetrieb.

### 2.3.1 Grundlagen der Nutzenbewertung

Nach [HOFFMEISTER 2000, Kap. 8] wird im Rahmen von Nutzenuntersuchungen ein Bewertungsgegenstand anhand mehrerer Bewertungskriterien zusammenfassend beurteilt. Diese Kriterien werden für jeden Gegenstand individuell festgelegt. Damit sollen unterschiedliche Ausprägungen bestimmter Merkmale ermittelt werden. Bei der Betrachtung von Investitionsentscheidungen werden zumeist monetäre Ergebnisgrößen, z.B. Barwerte, untersucht. Deren Berechnung bereitet im Allgemeinen wenige Schwierigkeiten, beschreibt aber den Bewertungsgegenstand oft nur unzureichend. Die Leit- und Sicherungstechnik besitzt weitere Merkmale, die sich zwar in Zahlen (quantitativ), aber nicht in monetären Einheiten ausdrücken lassen. Dazu zählen z.B. der Belegungsgrad oder die Fahrzeit. Weiterhin gibt es Merkmale, z.B. Stellwerkstypen, die sich nur mit Worten (qualitativ) beschreiben lassen. Zur Kategorisierung der Ergebnisgrößen ist eine Unterteilung gemäß Abbildung 5 geeignet [vgl. HOFFMEISTER 2000, S. 288].

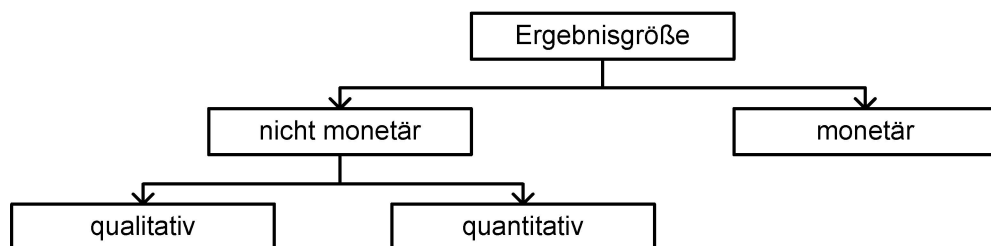


Abbildung 5: Arten von Ergebnisgrößen

Das Ziel einer Bewertung besteht darin, die Bewertungsgegenstände in eine Reihenfolge zu bringen, so dass es möglich wird, den am besten geeigneten zu ermitteln. Um das Ausmaß der Zielerreichung feststellen zu können, werden Zielerreichungsgrade verwendet. Das bedeutet, auch qualitativ bewertbare Kriterien müssen mit Hilfe von Zahlen ausgedrückt werden. Dafür unterscheidet Hoffmeister verschiedene Bewertungsverfahren:

- summarische Bewertung
- analytische Bewertung

Für diese Arbeit interessant ist die analytische Bewertung, bei der „jedes Bewertungskriterium einzeln zu bewerten, und abschließend [...] die Gesamtbewertung aus den Einzelbewertungen zu ermitteln“ [HOFFMEISTER 2000, S. 278] ist. Bei der summarischen Bewertung ist keine eindeutige Rangordnung der Bewertungsobjekte ermittelbar, was den Vergleich verschiedener Varianten unmöglich macht.

Zur Interpretation der Werte wird i.d.R. die Kardinalskala herangezogen. Die Ordinalskala ist nur bedingt verwendbar, da mit ordinal skalierten Werten keine Rechenoperationen durchgeführt werden können. Nominal skalierte Werte sind für die Nutzenbewertung nicht geeignet.

### 2.3.2 Zielerreichungsgrade von Nutzenuntersuchungen

In Nutzenuntersuchungen werden die Bewertungen einzelner Kriterien zur Gesamtbewertung zusammengefasst. Hier besteht die Möglichkeit der Gewichtung von Kriterien, um deren Einfluss auf die Gesamtbewertung zu bestimmen. Somit vereint die Nutzenuntersuchung objektive und subjektive Informationen zur Einschätzung von Bewertungsgegenständen. In [HOFFMEISTER 2000, S. 278] wird sie wie folgt definiert:

Die Nutzenuntersuchung dient innerhalb des Entscheidungsprozesses der systematischen Entscheidungsvorbereitung bei der Auswahl komplexer Handlungsalternativen.

Um nichtmonetäre Ergebnisgrößen vergleichbar zu machen, sind nach [HOFFMEISTER 2000, S. 287] deren Zielerreichungsgrade ( $fz$ ) zu berechnen. Dazu werden die ordinal skalierten Aussagen in eine Kardinalskala umgewandelt. Die Skala wird in Punkten von 0 für die schlechteste bis 10 für die beste Zielerreichung angegeben. Somit wird eine messbare Rangordnung geschaffen.

Bei **qualitativen Ergebnisgrößen** erfolgt die Zuordnung über Tabellen. Gebräuchlich ist beispielsweise die folgende:

qualitativ		Zielerreichungsgrad ( $fz$ )
Sehr gut	+	$fz = 10$ ( $fz_{max}$ )
	-	$fz = 9$
Gut	+	$fz = 8$
	-	$fz = 7$
Befriedigend	+	$fz = 6$
		$fz = 5$
	-	$fz = 4$
Ausreichend	+	$fz = 3$
	-	$fz = 2$
Mangelhaft	+	$fz = 1$
	-	$fz = 0$ ( $fz_{min}$ )

Tabelle 1: Zielerreichungsgrade

Bei **quantitativen Ergebnisgrößen** werden die Zielerreichungsgrade mit Hilfe einer Transformationsfunktion ermittelt:

$$fz_x = \frac{fz_{max} - fz_{min}}{x_{max} - x_{min}}(x - x_{min}) \quad (1)$$

Die Variablen  $x_{max}$  und  $x_{min}$  bestimmen die beiden Extremwerte einer Ergebnisgröße. Sie können auch frei festgelegt werden. Die Variable  $x$  bezeichnet den Wert einer Ergebnisgröße, deren Zielerreichungsgrad  $fz_x$  zu berechnen ist.  $fz_{max}$  und  $fz_{min}$  determinieren die Extremwerte einer Ergebnisgröße der zu vergleichenden Alternativen.

Um auch **monetäre Ergebnisgrößen** in die Bewertung einbeziehen zu können und vergleichbar zu machen, werden diese in Zielerreichungsgrade umgerechnet. Dabei werden beispielsweise die zuvor berechneten Einnahmenbarwerte  $B_x$  mit Hilfe der folgenden Formel in vergleichbare Zielerreichungsgrade umgewandelt:

$$fz(B_x) = 10 - \left( \frac{B_{max}}{B_x} - 1 \right) \cdot 10 \quad (2)$$

### 2.3.3 Gewichtung & Entscheidungsfindung

In einem rein subjektiven Prozess entscheidet der Anwender der Nutzwertanalyse, wie wichtig die einzelnen Größen seiner Meinung nach sind. Durch das Festlegen von Gewichtungsfaktoren in Form von Prozentsätzen fließen die Ergebnisgrößen unterschiedlich stark in das Gesamtergebnis ein. Die Summe aller Gewichtungsfaktoren muss 100% ergeben. [vgl. HOFFMEISTER 2000, S. 294-296]. Zur Definition von Unterzielen, können einzelne Gewichtungsfaktoren weiter untergliedert werden, wobei die Summe der Unterfaktoren selbst wieder 100% ergeben muss. Im EWA-Tool werden die Gewichte der Kriterien vom Anwender manuell vergeben, wobei die Überprüfung auf Vollständigkeit (Summe 100%) automatisch erfolgt.

Die Entscheidung, welche der unterschiedlichen Handlungsalternativen als vorteilhaft erscheint, wird im EWA-Tool mit Hilfe einer Rangfolge dargestellt. Es werden die Ränge für die Kosten-Erlös-Rechnung, die Nutzwertanalyse und das Gesamtergebnis ausgegeben. Zusätzliche Unterstützung bei der Entscheidungsfindung erhält der Anwender durch Grafiken und Diagramme, in denen er Eigenschaften der Handlungsalternativen direkt vergleichen kann. Somit stehen Mittel zur rechnerischen und zur argumentativen Entscheidungsfindung zur Verfügung.

## 3 Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an der Leit- und Sicherungstechnik

Die Wirtschaftlichkeit eines Systems bewertet das Verhältnis der Investitionen (Aufwand) zu deren Folgewirkungen (Ertrag). Das derzeit in der Entwicklung befindliche EWA-Tool soll die Wirtschaftlichkeit von Leit- und Sicherungstechnik über die gesamte Nutzungsdauer abbilden. Unter dem Begriff Investitionen sind in diesem Zusammenhang nicht einmalige Anlagen von Kapital in Vermögen zu verstehen, sondern solche, die über den gesamten Betrachtungszeitraum anfallen. Demnach ist hier Investition im langfristigen Sinne gemeint [vgl. WÖHE und DÖRING 2002, S. 599 ff].

An dieser Stelle werden Einflussgrößen, die die Kosten oder Nutzen der Leit- und Sicherungstechnik determinieren, analysiert. Zusammenhänge zwischen ihnen werden

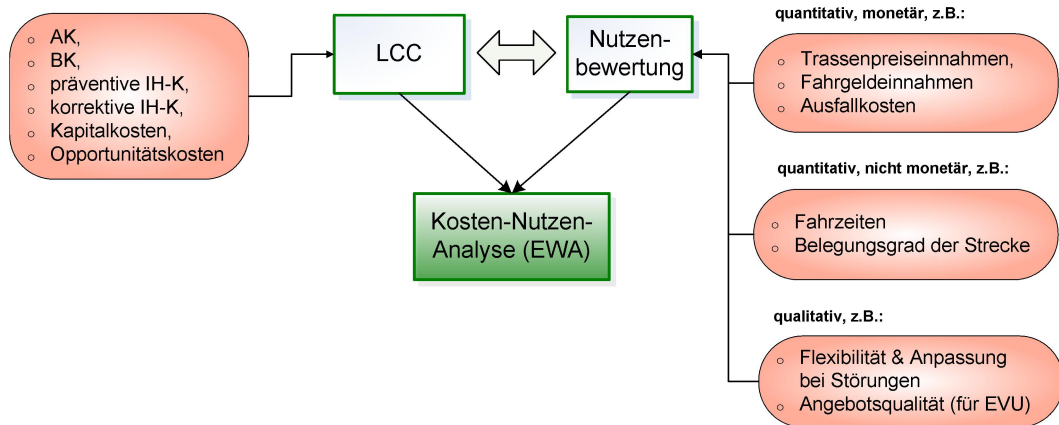


Abbildung 6: Einflussgrößen der Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen

kenntlich gemacht. Die Einflussgrößen und ihre Zusammenhänge in der Wirtschaftlichkeitsanalyse sind in Abbildung 6 dargestellt.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst der linke Teil der Abbildung (Kosten — Kapitel 3.1) und anschließend der rechte Teil (Nutzen — Kapitel 3.2 bis 3.4) genauer untersucht.

### 3.1 Analyse der Lebenszykluskosten

Hervorgerufen durch die Trennung von Infrastruktur und Betrieb im Rahmen der Bahnreform werden die Einflussgrößen auf die Kosten von Eisenbahnsystemen getrennt für Eisenbahninfrastrukturunternehmen und Eisenbahnverkehrsunternehmen erfasst. Die Gesamtkosten ergeben sich dann aus der Summe beider Teile. Für den Eisenbahnsektor, dessen technische Einrichtungen durch hohe Lebensdauern geprägt sind, ist eine dauerhafte Optimierung der Kosten-Nutzen-Strukturen nur durch langfristige Betrachtung von Kosten und Erlösen, d.h. Lebenszykluskostenrechnung, möglich.

Nach [ZEBOLD 1996, S. 2] liegt der Grundgedanke der Lebenszykluskostenrechnung darin, „dass zur Erreichung kostengünstiger Systeme die Gesamtkosten — bestehend aus **Anfangs- und Folgekosten** — zu analysieren sind“.

Genauer werden Lebenszykluskosten in [DIN 2005] als „Prozess der wirtschaftlichen Analyse zur Abschätzung der gesamten Beschaffungs- und Besitz- und Entsorgungskosten eines Produktes“ definiert. Eine Aufteilung des Lebenszyklus in seine sechs wesentlichen Phasen ist in Abbildung 7 dargestellt. Die vertikale Trennung ver-

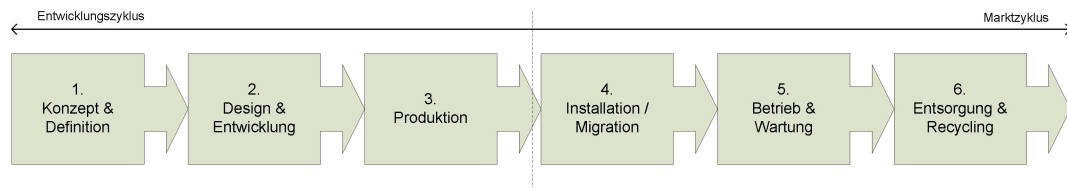


Abbildung 7: Lebenszyklus-Phasen, Quelle: [DIN 2005]

deutlicht dabei zwei Sichtweisen auf die Lebenszykluskosten. Der Entwicklungszyklus ist eher für den Hersteller, der Marktzyklus eher für den Betreiber des Produktes von Interesse.

In der Praxis kann der Lebenszyklus oft nicht vollständig kostenmäßig betrachtet werden, da dem Controller nicht alle Daten zur Verfügung stehen. Dem Betreiber fehlen in der Regel genaue Angaben über die Herstellung eines Produktes, dem Hersteller wiederum fehlen Daten zu dessen Nutzung. Für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit von Leit- und Sicherungstechnik ist die Betrachtung des Marktzyklus maßgeblich, da Eisenbahnunternehmen als deren Betreiber zu verstehen sind. Die Phasen des Entwicklungszyklus können vom Betreiber i.d.R. als Anschaffungskosten angesehen werden.

In [SCHEIER 2007] wurden bereits umfangreiche Untersuchungen zu Lebenszykluskosten von Eisenbahnsystemen durchgeführt. Die Erkenntnisse aus dieser Arbeit können als Grundlage für weiterführende Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen verwendet werden. Sie sollen deshalb an dieser Stelle nicht erneut aufgestellt, sondern nur zusammenfassend dargestellt werden.

Die Kostenkomponenten, die den Eisenbahnbetrieb aus Sicht des Betreibers über den gesamten Lebenszyklus beeinflussen, können der Kostengliederungsstruktur in Abbildung 8 entnommen werden. Im Folgenden werden einzelne Kostenkomponenten für die LST erläutert.

#### 3.1.1 Kostengliederungsstruktur der Leit- und Sicherungstechnik

Wendet man die Kostengliederungsstruktur aus Abbildung 8 auf die Eisenbahninfrastruktur an, wird ersichtlich, welche Kostenkomponenten im EWA-Tool für jedes Infrastrukturelement zu berechnen sind:

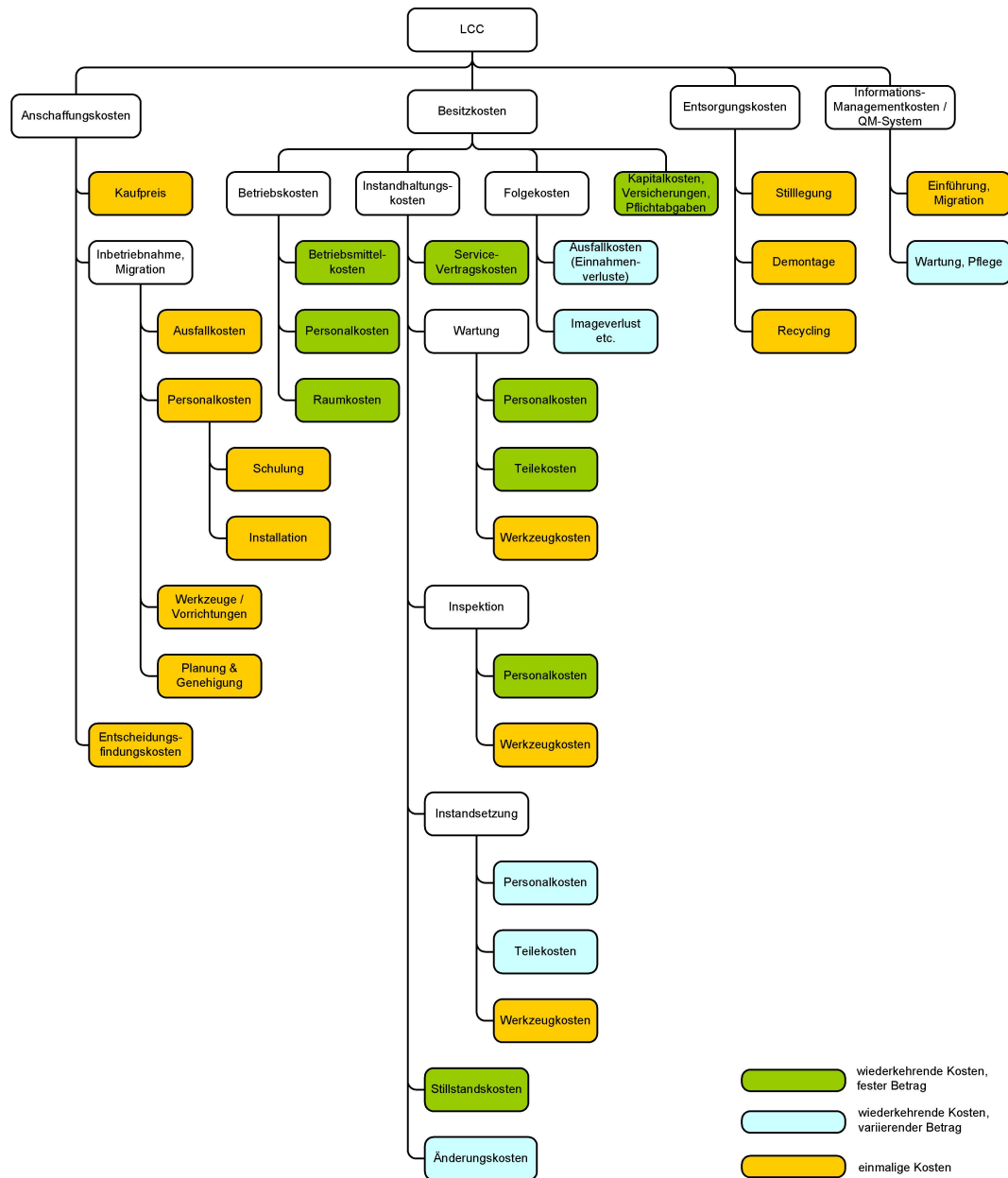


Abbildung 8: Kostengliederungsstruktur der Lebenszykluskosten, Quelle: [SCHEIER und BÖHM 2008]



**Anschaffungskosten:** Hierzu zählen der Kaufpreis inkl. Planung und Genehmigung (PK), Installation und Verkabelung (IK), Mitarbeiterschulung, sowie Kapitalkosten für Infrastruktur.

Die Anschaffungskosten (AK) werden mikroskopisch für jedes Infrastrukturelement über die Nutzungsdauer periodisiert und linear abgeschrieben. Das entspricht dem intern bei der DB AG verwendeten Verfahren. [vgl. LIENAU 2007, S. 4] Es ist erforderlich, im EWA-Tool zu jedem Infrastrukturelement dessen Anschaffungsdatum und seine Nutzungsdauer (ND) zu hinterlegen. Somit kann eine Wirtschaftlichkeitsuntersuchung an einem beliebigen Zeitpunkt beginnen. Das heißt, Infrastrukturelemente können bei Untersuchungsbeginn bereits existieren. Ebenso muss eine Ersatzinvestition eingeplant werden, falls ein Element das Ende seiner Lebensdauer vor Untersuchungsende erreicht.

**Besitzkosten:** Sie unterteilen sich in die folgenden Unterpunkte und werden jedem Infrastrukturelement in der LCC-Berechnung in jener Periode zugeordnet, in der sie anfallen.

1. Betriebskosten (BK) (Personal in Stellwerken, Strom, Heizung etc.)
2. präventive Instandhaltungskosten (PIHK)<sup>13</sup> (Personal & Material)
3. korrektive Instandhaltungskosten (KIHK)<sup>14</sup> (Ersatzkosten durch Unwetter, Zerstörung, Diebstahl)
4. Betriebserschwerungskosten (BEK)<sup>15</sup>

Im Allgemeinen wird im EWA-Tool eine jahresweise Betrachtung der Besitzkosten angestrebt.

**Rückbaukosten:** Die Rückbaukosten (RBK) fallen in der Regel nur an, wenn in einer Infrastrukturvariante Bauelemente zu entfernen sind, oder wenn entschieden wurde, einen Streckenteil stillzulegen.

Die Informationsmanagementkosten sind nicht entscheidungsrelevant, da sie bei jeder Maßnahme anfallen. Sie können nach Abschluss der Untersuchung en bloc auf das Endergebnis addiert werden.

---

<sup>13</sup>IHK, die der Vorbeugung vor Ausfällen dienen, z.B. Wartung, Inspektion, vgl. Kap. 3.1.5

<sup>14</sup>IHK, die zur Behebung von Ausfällen eingesetzt werden

<sup>15</sup>Folgekosten, die durch Nichtverfügbarkeit oder eingeschränkte Verfügbarkeit einzelner Bahnanlagen entstehen, z.B. Pönale für Verspätungen, vgl. Kap. 3.1.6

### 3.1.2 Infrastrukturelemente der Leit- und Sicherungstechnik

Geschäftszweck eines Eisenbahninfrastrukturunternehmens ist nach [KNEWITZ 1994] „die Bereitstellung von Fahrplantrassen.“ Grundlage dafür ist das Vorhandensein der entsprechenden Infrastruktur. Auf Grund ihrer Langlebigkeit ist in Europa noch immer Eisenbahninfrastruktur aus allen Epochen der Entwicklung vorhanden. Während Neubaustrecken nur noch mit elektronischer Technik ausgerüstet werden, existieren auf vielen bestehenden Strecken Leit- und Sicherungseinrichtungen aus über 100 Jahren Technikgeschichte — angefangen bei mit Muskelkraft zu betätigenden mechanischen Stellwerken über elektromechanische bis zu Relaisstellwerken. Um alle derzeit existierenden Infrastrukturen im EWA-Tool abbilden zu können, muss bekannt sein, welche Elemente darin vorkommen können. Folgende Elemente müssen nach [BECK 2007] zur Berechnung der Lebenszykluskosten der Leit- und Sicherungstechnik für alle existierenden Technologien berücksichtigt werden:

- |                                 |                                  |
|---------------------------------|----------------------------------|
| • Achszähler / Auflösekontakte  | • Lineside Electronic Unit       |
| • Bahnübergangsanlagen          | • Linienförmige Zugbeeinflussung |
| • Elektromechanisches Stellwerk | • Mechanisches Stellwerk         |
| • Elektronisches Stellwerk      | • PZB-Magneten                   |
| • Euro-Loop                     | • Radio Block Center             |
| • fixierte Balisen              | • Relais-Stellwerk               |
| • Gleissperren                  | • transparente Balise            |
| • Gleisstromkreis               | • Trapeztafeln                   |
| • Haltetafeln                   | • Weichenantrieb                 |
| • Haupt- und Vorsignale         | • Zugleiter                      |

Zu jedem Element sind Kostensätze sowie Informationen zur Instandhaltung anzugeben. Diese werden in den folgen Unterkapiteln näher beschrieben. Erläuterungen zu den bahnspezifischen Begriffen der Infrastruktur sind in Anhang B zu finden.

### 3.1.3 Ermittlung der Anschaffungs- und Rückbaukosten

Nachdem nun bekannt ist, welche Infrastrukturelemente in die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung einfließen sollen, müssen diese mit Kosten belegt werden. In Deutschland

existiert ein Verfahren zur überschlägigen Ermittlung der Herstellkosten auf Basis von Stelleinheiten (STE). [vgl. LIENAU 2007, S. 60 f] Als Stelleinheiten werden verschiedene Arten von Signalen, Geschwindigkeitsanzeiger und Weichen zusammengefasst. Die Bewertung von Stelleinheiten erfolgt auf Basis von Durchschnittswerten aus bereits abgeschlossenen Baumaßnahmen. Im aktuellen Kostenermittlungsbuch [vgl. DB NETZ AG 2008] wird eine STE mit 81.806,70 Euro beziffert.

Das Verfahren nach STE ist recht grob und nicht unumstritten. Exaktere Werte liefert die Berechnung nach Anschlusseinheiten (ASE). Hier werden sowohl verschiedene Arten von Signalen, als auch Gleisfreimeldeanlage, PZB-Magnete, Weichen usw. einzeln definiert und bepreist. [vgl. LIENAU 2007, S. 64 ff] Somit kann jedem Infrastrukturelement ein individueller Kostensatz zugewiesen werden.

Für das EWA-Tool ist die Berechnung der Infrastrukturkosten auf Basis von Anschlusseinheiten vorzuziehen. Die Berechnung von Stelleinheiten ist für die Kalkulation elektronischer Stellwerke trotzdem notwendig, da diese auf Basis der Anzahl angeschlossener STE dimensioniert werden.

Es ist naheliegend, dass AK für alle Infrastrukturelemente anfallen. Eine Ausnahme bilden alte mechanische Stellwerke. Hier wird angenommen, dass sie bereits existieren und buchhalterisch vollständig abgeschrieben sind. Zu einigen Infrastrukturelementen liegen bereits konkrete Durchschnitts-Kostensätze vor. Es ist vorteilhaft, diese zu verwenden, da sie die realen Kosten wesentlich genauer widerspiegeln.

Die Rückbaukosten bzw. Entsorgungskosten fallen gemäß der Kostengliederungsstruktur am Ende des Lebenszyklus an. Da sie einmalige Kosten sind und im Gegensatz zu den Besitzkosten nicht in jeder Periode anfallen, können sie ähnlich den Anschaffungskosten behandelt werden. Es sind im EWA-Tool jedem Infrastrukturelement die Kosten zuzuordnen, die durch dessen Rückbau und Demontage entstehen.

### 3.1.4 Berechnung der periodisierten Betriebskosten

Die jährlichen Betriebskosten lassen sich für jedes Infrastrukturelement  $i$  anhand der folgenden Formel berechnen:

$$BK_i = \underbrace{\sum_j d_{i,j} \cdot p_{i,j}}_{\text{Personalkosten}} + \underbrace{\sum_k m_{i,k} \cdot \mu_{i,k}}_{\text{Materialkosten}} \quad (3)$$

Dabei ist unter  $d_{i,j}$  die jährliche Betriebsdauer (Arbeitszeit) eines jeden beteiligten Mitarbeiters  $j$  in Stunden und unter  $p_{i,j}$  dessen erforderlicher Stundensatz (Mitarbeiter-Stundenlohn) zu verstehen. Mit  $j$  werden Mitarbeiter in verschiedene Mitarbeiter-Typen kategorisiert (z.B. Fahrdienstleiter, Hausmeister, Zugbegleiter usw.). Mit  $m_{i,k}$  werden die Stückkosten der erforderlichen Verbrauchsmaterialien  $k$  (z.B. Strom, Diesel) und mit  $\mu_{i,k}$  deren Einsatzmenge pro Jahr bezeichnet.

### 3.1.5 Instandhaltungsstrategien und –kosten

Die DB AG führt zur Instandhaltung des Fahrweges zyklische Inspektionen, d.h. in festen Zeitintervallen, durch. Kosten für die präventive Instandhaltung (PIHK) fallen daher für alle Infrastrukturelemente an. In der Konzernrichtlinie 892 (LST-Anlagen montieren und instandhalten) der DB AG [DB NETZ AG 2005] wurden für jedes Element konkrete Wartungsaufgaben und –intervalle festgelegt, aus denen sich der jährliche Instandhaltungsaufwand ableiten lässt. So sind beispielsweise die Laternen von Signalen alle 12 Monate zu überprüfen.

Alternativ dazu existieren Verfahren der zustandsorientierten Instandhaltung. Hier werden Instandhaltungsmaßnahmen abhängig vom Zustand der Infrastruktur unternommen. Dies erfordert jedoch einen höheren technischen Aufwand und das Vorhandensein entsprechender Diagnoseeinrichtungen. In der Fachliteratur sind umfangreiche Diskussionen über die Vor- und Nachteile der zustandsorientierten Instandhaltung zu finden, selbstverständlich immer in Abhängigkeit vom instand zu haltenden Gegenstand.

In [LIENAU 2007, S. 82 ff] wird gezeigt, dass der Instandhaltungsaufwand für Leit- und Sicherungstechnik kaum von der Belastung abhängt. Somit ist die Berechnung

von Wartungs- und Instandhaltungskosten auf Intervallbasis als ausreichend anzusehen. Hierbei kann nach einem einfachen Schema vorgegangen werden: Die Kosten, die für die Wartung eines Bauteils anfallen sind mit der Zahl der Inspektionen über seine Lebensdauer zu multiplizieren. Für jedes Infrastrukturelement  $i$  lässt sich der jährliche **präventive Instandhaltungsaufwand** wie folgt berechnen:

$$PIHK_i = n_i \cdot \delta_i \cdot \underbrace{\sum_j p_{i,j}}_{\text{Personalkosten}} + \underbrace{\sum_k m_{i,k} \cdot \mu_{i,k}}_{\text{Materialkosten}} \quad (4)$$

Dabei beziffert  $n_i$  die Anzahl der jährlich erforderlichen Instandhaltungen und  $\delta_i$  die notwendige Dauer pro Instandhaltung in Stunden.  $p_{i,j}$  bezeichnet den erforderlichen Mitarbeiter-Stundenlohn eines jeden beteiligten Mitarbeiters  $j$ . Der Ressourcenverbrauch wird analog zu den Betriebskosten berechnet.

Im Rahmen der geplanten Weiterentwicklung des EWA-Tools um die Untersuchung anderer Komponenten des Eisenbahnbetriebes sollte bei der Programmierung an Möglichkeiten zur Berechnung von zustandsorientierten Instandhaltungstechniken gedacht werden. Hier sei insbesondere an den Oberbau (Schienen, Weichen, Oberleitungen usw.) gedacht. Die entsprechenden Belastungsgrenzwerte von Bauteilen können von Herstellern bzw. Betreibern beigesteuert werden. Daten über die Belastung einer Strecke (Züge pro Zeiteinheit) können mit der Eisenbahnbetriebssimulation erfasst werden.

**Korrektive Instandhaltungskosten** (KIHK) können zwar für jedes Element anfallen, sind jedoch nicht planbar. Ihre Berechnung erfolgt im EWA-Tool ähnlich der Berechnung der PIHK:

$$KIHK_i = n_i \cdot \delta_i \cdot \underbrace{\sum_j p_{i,j}}_{\text{Personalkosten}} + \underbrace{\sum_k m_{i,k} \cdot \mu_{i,k}}_{\text{Materialkosten}} \quad (5)$$

Einzig der Parameter  $n_i$ , die Zahl der jährlichen Ausfälle, ist schwer zu bestimmen. Hier gibt es auch in der Praxis bisher kein gängiges Verfahren. Die korrektiven Instandhaltungskosten werden daher nur als ein Erfahrungswert, beispielsweise als 10% der jährlichen präventiven Instandhaltungskosten, angegeben. Im EWA-Tool ist also

zu jedem Infrastrukturelement ein Feld vorzuhalten, in dem die KIIHK als Anteilswert der PIHK einzutragen sind.

### 3.1.6 Folgekosten und Betriebserschwerniskosten

Unter den Folgekosten bzw. Betriebserschwerniskosten (BEK) sind nach Abbildung 8 in erster Linie Kosten durch den Ausfall von Infrastrukturelementen zu verstehen. Sie fallen an, sobald vom Regelbetrieb abgewichen wird. Dies kann unter anderem bei geplanten Streckensperrungen auf Grund von Wartungsarbeiten oder Langsamfahrstellen<sup>16</sup>, aber auch durch den plötzlichen Ausfall von Systemkomponenten hervorgerufen werden. Regelmäßig anfallende BEK sind in Abbildung 9 dargestellt.

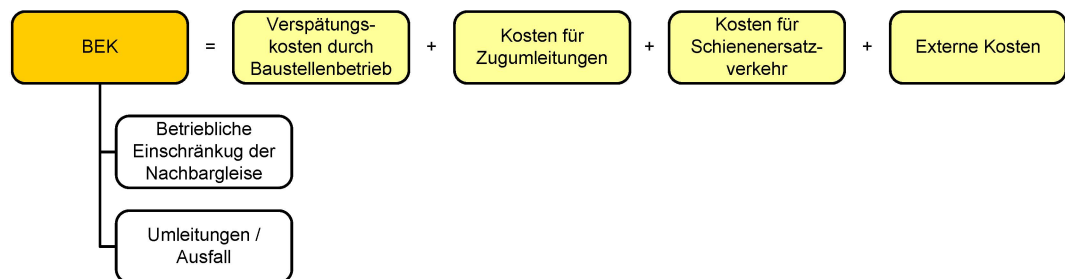


Abbildung 9: Systematisierung der Betriebserschwerniskosten (BEK), nach [SCHILLING und LÜCKING 2003]

Da nach [VEIT 2007, S. 894] „Betriebserschwerniskosten [...] bis zu einem Drittel der Jahreskosten ausmachen können, 15% jedoch auch unter günstigen Bedingungen [...] nicht unterschreiten“, sollten sie als maßgeblicher Kostentreiber in den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen beachtet werden. Im EWA-Tool ist dafür ein Feld vorzuhalten, in dem die BEK als Anteilswert aus der Summe der Betriebs- und Instandhaltungskosten eines jeden Infrastrukturelements einzutragen sind.

BEK sind keinesfalls nur auf die Infrastruktur zu beziehen. Auch ein auf der Strecke lieengebliebenes Fahrzeug kann solche verursachen. Für die Beurteilung von Lebenszykluskosten ist eine spezielle Form der Betriebserschwerniskosten, die Zahlung von Pönalien<sup>17</sup> auf Grund von Verspätungen, interessant. Wie aus der Abbildung 4 abzulesen ist, können BEK durch Verspätungen in drei Situationen auftreten:

<sup>16</sup>Langsamfahrstelle: Streckenabschnitt, in dem die technisch mögliche Höchstgeschwindigkeit vorübergehend eingeschränkt ist

<sup>17</sup>Konventionalstrafen

1. Zahlungen des EIU an das / die EVU bei Ausfall oder Überlastung der Infrastruktur
2. Zahlungen eines EVU an das EIU bei Blockierung von Infrastrukturelementen über den Zeitraum der Trassenvergabe hinaus
3. Zahlungen eines EVU an andere EVU, falls nachfolgende Züge auf der Strecke behindert werden

Die Abrechnung von BEK erfolgt über Verspätungsminuten. Die Eisenbahnbetriebssimulation kann für jeden Zug Abweichungen vom Fahrplan ausgeben. Somit können Verspätungsminuten direkt in das EWA-Tool übernommen werden. Sie werden dort mit einem Kostenfaktor multipliziert und dem jeweiligen Unternehmen als Einnahmen bzw. Ausgaben zugeordnet. Der Faktor liegt nach [HEMPE 2006, S. 140] bei 15 Euro pro Verspätungsminute.

### 3.1.7 Kapitalkosten

Für das zur Finanzierung von Investitionsprojekten erforderliche Kapital gelten im Bereich der Eisenbahninfrastruktur einige besondere Regelungen. Das Bundesschienenwegeausbaugesetz gewährt den Eisenbahnen des Bundes zinslose Darlehen für Ersatzinvestitionen an der Infrastruktur. Andere Möglichkeiten zur Finanzierung ermöglichen z.B. das Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz und das Eisenbahnkreuzungsgesetz. [vgl. LIENAU 2007, S. 5]

Durch solche Besonderheiten ist es schwierig, die Kapitalkosten korrekt zu erfassen. Es soll aber die Formel zur Berechnung der Opportunitätskosten für jede Periode ( $t$ ) aus dem bereits erwähnten Excel-basierten Tool zur LCC-Berechnung (siehe Kapitel 1.2) weiterhin Verwendung finden:

$$KK_t = \left[ AK + PK + IK + RBK - \left( \frac{AK + PK + IK + RBK}{ND} \right) t \right] z \quad (6)$$

Der kalkulatorische Zins ( $z$ ) wird darin mit 8% berücksichtigt, was einem bei der DB AG verwendeten Wert entspricht. Im EWA-Tool kann dieser Wert als Voreinstellung dienen, muss aber flexibel einzugeben sein.

### 3.1.8 Einflüsse von EVU auf die Lebenszykluskosten

Geschäftsgrundlage von Eisenbahnverkehrsunternehmen ist das Erbringen der eigentlichen Verkehrsleistung, d.h. der Beförderung von Personen bzw. dem Transport von Gütern. Die Durchführung von Zugverkehren erfolgt auf einer Infrastruktur, die vom Eisenbahninfrastrukturunternehmen bereitgestellt wird. Durch diese Trennung müssen die Belange des EVU im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung von Leit- und Sicherungstechnik nur an einem Punkt betrachtet werden: Triebfahrzeuge und Triebwagen müssen mit der streckenseitigen Ausrüstung kompatibel sein. Wird auf einer Strecke beispielsweise die punktförmige Zugbeeinflussung eingesetzt, so muss das Triebfahrzeug fähig sein, die Gleismagnete und deren Zustand erkennen zu können.

Der Aspekt wird besonders im grenzüberschreitenden Verkehr deutlich. In den Ländern Europas werden im Eisenbahnwesen verschiedene Techniken der Zugbeeinflussung eingesetzt und durch die jeweilige nationale Aufsichtsbehörde zertifiziert. Soll nun ein Zug über Landesgrenzen hinaus verkehren, erfordert dies in der Regel eine Doppelausrüstung der Triebfahrzeuge ohne dass dies eine direkt wirkende Nutzenerhöhung mit sich bringt. [vgl. SCHEIER 2007, S. 38]

Da dieses Problem in der derzeit geplanten Version des EWA-Tools noch nicht erfasst werden soll, geht es nicht in die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen ein. Im Zuge der geplanten Erweiterung des EWA-Tools um die Belange der Eisenbahnverkehrsunternehmen muss dieses Thema jedoch erneut aufgegriffen werden. Ein mögliches zu untersuchendes Kriterium wäre dann die Bewertung des Nutzens von Fahrzeitverkürzungen gegenüber den Kosten der Doppelausrüstung, da dann ein Lokomotivwechsel an einer Systemgrenze entfallen kann.

## 3.2 Monetär bewertbarer Nutzen / Erlöse

In der Lebenszykluskostenrechnung wird die Erlösseite nur zum Teil berücksichtigt [vgl. ZEBOLD 1996, S. 3]. Um Aussagen über den Erfolg eines Produkts treffen zu können, ist eine Gegenüberstellung seiner Kosten und Erlöse über die Lebensdauer zweckmäßig. Welche Erlöse in der Eisenbahnbetriebswirtschaft auftreten können, wird in den folgenden beiden Unterkapiteln erörtert.



### 3.2.1 Erlöse des EIU

Aus Sicht eines Eisenbahninfrastrukturunternehmens sind Erlöse aus dem Verkauf von bereitgestellten Trassen zu erwirtschaften. Unter einer Trasse versteht man die Bereitstellung von Fahrwegskapazitäten auf einer bestimmten Relation zu einer bestimmten Zeit über die vom EIU betriebene Infrastruktur. [vgl. THIEL 2008, S. 67] Zur Berechnung von Trassenentgelten wurden bereits verschiedene Strategien entwickelt. Gemäß § 14 Abs. 4 AEG haben "Betreiber von Schienenwegen [...] ihre Entgelte [...] so zu bemessen, dass die ihnen insgesamt für die Erbringung der Pflichtleistungen [...] entstehenden Kosten zuzüglich einer Rendite, die am Markt erzielt werden kann, ausgeglichen werden."

Als Referenzsystem für diese Arbeit wird das Modulare Trassenpreissystem der DB Netz AG herangezogen. [vgl. DB NETZ AG 2007] Damit die Eisenbahnverkehrsunternehmen die zu entrichtenden Trassenentgelte schnell berechnen können, stellt die DB AG eine Software zur Verfügung. Somit ist es nicht erforderlich, das System in seiner Komplexität zu verstehen. Für das EWA-Tool kann die Trassenpreisauskuftssoftware jedoch nicht verwendet werden, da

1. darin nur bereits existierende Trassen berechnet werden können, der Sinn des EWA-Tools aber auch in der wirtschaftlichen Überprüfung neu zu bauender Strecken liegt.
2. sie nur unzureichende Im- und Exportfunktionen zur Verfügung stellt.

Der Algorithmus zur Berechnung von Trassenentgelten muss demnach im EWA-Tool implementiert werden. Er hängt von verschiedenen Faktoren, unter anderem der Streckenkategorie, deren zulässiger Höchstgeschwindigkeit und den Eigenschaften des Zuges ab. [vgl. WIELAND 2006] und [RUMPF 2007] Zur automatisierten Berechnung der Erlöse aus Trassenentgelten können aus der Eisenbahnbetriebssimulation für jeden Streckenabschnitt  $i$  folgende Daten in das RailML-Schema überführt werden:

- Streckenkategorie ( $c_i$ )
- Streckenlänge ( $l_i$ )
- Zugtyp inkl. dessen Gewicht ( $L_i$ )
- Verspätungen (Anreizsystem zur Verringerung von Störungen) ( $S_i$ )

Im EWA-Tool müssen anschließend noch die entsprechenden Kostensätze für die Streckenkategorien (Grundpreis und Produktfaktor  $G_i \cdot P_i$ ) hinterlegt werden. Weiterhin wird definiert, ob eine Strecke stark belastet ist ( $A_i \in \{1, 1.2\}$ ), sowie der Regionalfaktor ( $R_i$ ) festgelegt. Nun kann das Trassenentgelt für eine Relation  $\overline{AB}$ , welche aus  $n$  Streckenabschnitten besteht, wie folgt berechnet werden:

$$TE_{AB} = \sum_{i=1}^n (G_i \cdot P_i \cdot A_i \cdot R_i + L_i + S_i) \cdot l_i \quad (7)$$

Das Eisenbahninfrastrukturunternehmen nimmt mit dem Trassenpreissystem Einfluss auf die Verkehrsnachfrage. Zum Einen wird versucht, der Überlastung stark frequentierter Strecken entgegenzuwirken. Zum Anderen sollen auch Nebenstrecken mit schwacher Nachfrage zu attraktiven Konditionen angeboten werden. Damit wird einem typischen Problem der Verkehrswirtschaft, der ruinösen Konkurrenz, entgegengewirkt: Langlebige, durch hohe Fixkosten geprägte Anlagen erfordern eine hohe Kapitalbindung bei vergleichsweise geringen Grenzkosten. [vgl. FRERICH und MÜLLER 2004] Damit wird deutlich, dass das Vorhalten von Infrastruktur ein sehr teures Unternehmen sein kann, wenn diese nicht ausgenutzt wird. Genau das soll mit dem EWA-Tool evaluiert werden, um eine wirtschaftlich und betrieblich optimal dimensionierte Infrastruktur zu bestimmen.

### 3.2.2 Erlöse des EVU

Eisenbahnverkehrsunternehmen erzielen Erlöse aus dem Verkauf von Fahrkarten im Personenverkehr bzw. Transportkapazität im Güterverkehr. Im spurgeführten Personennahverkehr (SPNV) sind Subventionsgelder ebenfalls den Erlösen hinzuzurechnen. Diese Werte können nicht aus der Eisenbahnbetriebssimulation gewonnen, sondern müssen über eine Eingabemaske in das EWA-Tool eingegeben werden.

Fahrgeldeinnahmen hängen von der Zahl der Fahrgäste bzw. transportierten Gütereinheiten, d.h. von der Auslastung, ab. Informationen über die Auslastung von Zügen müssen demnach gesondert erhoben werden. Viele Eisenbahnverkehrsunternehmen führen dazu permanente Erhebungen (z.B. Fahrgastzählungen) mit Hilfe des Zugbegleitpersonals durch. Für Neubaustrecken müssen Prognosen zur Verkehrsnachfrage

erstellt werden. Da dies vor der Projektierung von Maßnahmen in der Regel ohnehin erfolgt, sollte die Beschaffung der Daten im Bedarfsfall kein Problem darstellen.

Monetäre Erlöse der Eisenbahnverkehrsunternehmen haben keinen direkten Einfluss auf die Leit- und Sicherungstechnik. Allerdings kann das EVU durch die Gestaltung seiner Preise Einfluss auf die Nachfrage nehmen und dementsprechend auf die Auslastung der Strecken einwirken. Somit ist ein indirekter Zusammenhang zwischen Leit- und Sicherungstechnik und den Erlösen des EVU gegeben. Dieser kann durch den Vergleich von Szenarien dargestellt werden und sollte im EWA-Tool berücksichtigt werden, sobald die Aspekte von Eisenbahnverkehrsunternehmen integriert sind.

### 3.3 Quantitativ bewertbare Nutzenkriterien

Neben den monetär bewertbaren Nutzenkriterien gibt es eine Reihe von Merkmalen zur Beschreibung von Leit- und Sicherungstechnik, die nicht in Geldeinheiten auszudrücken sind. Die im EWA-Tool zu bewertenden quantitativen Kriterien sind in Tabelle 2, Seite 31 zusammengefasst. Darin wird ebenso beschrieben, wie die Merkmale im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse zu quantifizieren sind. Mit Hilfe der Formel 1 können die jeweiligen Merkmalswerte in Zielerreichungsgrade umgerechnet werden. Dies soll im EWA-Tool bereits automatisch erfolgen. Der Anwender kann noch die Gewichtung der einzelnen Parameter vornehmen.

In den folgenden Unterabschnitten werden wichtige Kenngrößen genauer erläutert und untersucht, inwiefern sie in der Nutzenbewertung betrachtet werden können.

#### 3.3.1 Leistungsfähigkeit und Leistungsverhalten

Eine wesentliche Kenngröße zur Ermittlung der Betriebsqualität eines Infrastruktursystems ist seine **Leistungsfähigkeit**. Im Falle der Eisenbahninfrastruktur kann diese mit der Anzahl von Zügen pro Zeiteinheit [Züge/t] ausgedrückt werden. Durch die eingangs beschriebenen Besonderheiten des Verkehrsträgers Schiene ist die Zahl der Fahrten pro Zeiteinheit beschränkt. Hier wird die Leistungsfähigkeit mit Hilfe der Mindestzugfolgezeit<sup>18</sup> bestimmt. Diese wiederum ist von der vorhandenen Infrastruk-

---

<sup>18</sup>Mindestzugfolgezeit: kleinster möglicher Zeitabstand zwischen zwei aufeinander folgenden Zugfahrten auf einer Strecke

Kriterium	Beschreibung	Quantifizierung
Belegungsgrad	Zeitlich genutzte Streckenauslastung. Falls in Zukunft mehr Nachfrage bestehen sollte, müssen noch Kapazitätsreserven vorhanden sein. Der Belegungsgrad kann für jede Strecke direkt aus der Betriebssimulation gewonnen werden, wenn ein Trassenprogramm für die Infrastruktur definiert wurde.	$\sum$ Mindestzugfolgezeiten / ZE
Mindestzugfolgezeit	Zeitlich genutzte Streckenauslastung. Falls in Zukunft mehr Nachfrage bestehen sollte, müssen noch Kapazitätsreserven vorhanden sein. Die Mindestzugfolgezeit lässt sich ebenfalls direkt in der Betriebssimulation berechnen. Die Auswertung kann dann im EWA-Tool erfolgen.	durchschnittliche Mindestzugfolgezeit
Leistungsfähigkeit einer Strecke	Anzahl von Zugtrassen je Betrachtungszeitraum, die bei gegebener Struktur des Zuggefüges (Zugeigenschaften, Reihenfolge) bei voller Nutzung der technisch zulässigen Fahrmöglichkeiten höchstens gefahren werden können. Daten zur Berechnung der Leistungsfähigkeit können aus der Betriebssimulation gewonnen werden. Die Berechnung selber kann erst im EWA-Tool erfolgen - siehe dazu auch Kapitel 3.3.1.	Zugtrassenzahl / ZE
Fahrzeit	Voraussichtliche Fahrzeit eines Zuges. Die Fahrzeit eines Zuges wird in der Betriebssimulation bereits errechnet und kann in das EWA-Tool importiert werden.	durchschnittliche Fahrzeit (separiert nach Zugkategorien)
Abbaubarkeit von Verspätungen	Die Betrachtung der Fahrstraßenbilde- und -auflösezeit hat Einfluss darauf, wie schnell entstandene Verspätungen wieder abgebaut werden können. Vgl. dazu auch Kapitel 3.3.3	zeitlich
Streckenhöchstgeschwindigkeit	Zeigt Flexibilität des Betriebsverfahrens bei Variation des Fahrplans bezüglich der Höchstgeschwindigkeit	km/h
Umlauf der Fahrzeuge	Für den gewählten Fahrplan erforderliche Zahl an Fahrzeugen (bzw. Fahrzeuggarnituren) Als Optimierungsproblem separat zu berechnen, vgl. Kapitel 5.	Anzahl

Tabelle 2: Quantitativ bewertbare Nutzenkriterien und ihre Betrachtung in der Wirtschaftlichkeitsanalyse

tur, dem verwendeten Betriebsverfahren<sup>19</sup> und dem Trassenprogramm<sup>20</sup> abhängig. [vgl. SCHEIER 2007, S. 34f] Wird das Trassenprogramm konstant gehalten, können die Infrastruktur und das Betriebsverfahren variiert und somit die Leistungsfähigkeit verschiedener Ausbauvarianten verglichen werden.

Die Leistungsfähigkeit allein sagt noch nichts über die Qualität einer Infrastrukturvariante aus. Eine aussagekräftigere Kenngröße ist das **Leistungsverhalten**. Es beschreibt das „Verhältnis zwischen der Belastung und der Betriebsqualität eines Systems.“ [PACHL 2004, S. 144] Im Falle der Eisenbahninfrastruktur wird unter dem Leistungsverhalten der Zusammenhang zwischen der Leistungsfähigkeit [Züge/t] und den Wartezeiten pro Zug, die durch gegenseitige Behinderungen entstehen, verstanden. Die in einem System auftretenden Wartezeiten steigen durch stärkere Belastung (steigende Zahl der Züge pro Zeiteinheit) progressiv an und konvergieren gegen die maximale Leistungsfähigkeit, vgl. Abbildung 10.

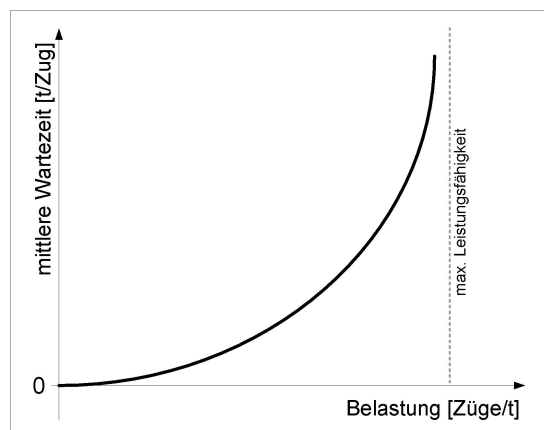


Abbildung 10: Wartezeitfunktion

### 3.3.2 Leistungsverhalten und Betriebsoptimum des EIU

Für Eisenbahnverkehrsunternehmen wäre die ideale Infrastruktur so dimensioniert, dass die Fahrzeit minimal ist. Das heißt, die Leistungsfähigkeit ist so groß, dass keine außerplanmäßigen Wartezeiten entstehen.

Für ein Eisenbahninfrastrukturunternehmen ist diese Dimensionierung nicht unbedingt ideal, da möglicherweise Kapazitäten vorgehalten werden, die nicht aus-

<sup>19</sup>Betriebsverfahren: System betrieblicher Regeln und technischer Mittel zur Durchführung von Fahrten [vgl. PACHL 2008]

<sup>20</sup>Trassenprogramm: planmäßige zeitliche und räumliche Belegung der Infrastruktur mit Zugtrassen

geschöpft werden. Das EIU ist als Gewinnmaximierer bestrebt, das optimale Verhältnis zwischen vorzuhaltender Kapazität und Auslastung zu finden.

Eine Eisenbahnstrecke kann als optimal ausgelastet angesehen werden, wenn sie von so vielen Zügen pro Zeiteinheit befahren wird, dass gerade noch keine außerplanmäßigen Wartezeiten<sup>21</sup> entstehen. Wird die Zahl der Züge/t weiter erhöht, steigen die außerplanmäßigen Wartezeiten, da sich die Züge gegenseitig behindern.

Weicht die tatsächliche Fahrzeit eines Zuges auf Grund von Kapazitätsproblemen von der lt. Fahrplan vorgesehenen Fahrzeit ab, sinkt die Betriebsqualität. Das EIU ist dann verpflichtet, an das betroffene EVU Betriebserschwerungskosten zu entrichten, was seinen Gewinn schmälert. Der maximale Gewinn des Eisenbahninfrastrukturunternehmens muss jedoch nicht zwangsläufig mit einer optimalen Auslastung korrespondieren. Eine gewisse Anzahl an Verspätungsminuten kann wirtschaftlich sinnvoll sein, denn eine zusätzlich vergebene Trasse bedeutet auch zusätzliche Einnahmen. Bestimmte BEK können möglicherweise in Kauf genommen werden.

Abbildung 11 verdeutlicht die Situation grafisch: Die Trassenpreiseinnahmen (grün) steigen linear mit der Anzahl der Züge. Die Kosten (orange) steigen progressiv. Sie sind auch größer Null, wenn kein Zug fährt, da Fixkosten anfallen. Aus der Differenz beider Funktionen ergibt sich der Gewinn des EIU (blau). Es wird deutlich, dass der größte Gewinn bei einer Auslastung entstehen kann, bei der bereits BEK zu zahlen sind (Betriebs-Optimum). Übersteigen die Kosten in einem Punkt die Einnahmen, ist kein wirtschaftlicher Betrieb mehr möglich (wirtschaftliches Betriebs-Maximum). Die Vergabe weiterer Trassen auf der Strecke sollte unterbleiben.

Unabhängig von der wirtschaftlichen Betrachtung der Auslastung kann es vorkommen, dass die technische Auslastung, d.h. die physikalisch mögliche Zahl von Zügen auf einer Strecke, bereits vor dem Betriebs-Maximum erreicht wird. In diesem Falle ist die Vergabe weiterer Trassen entsprechend vorzeitig zu unterlassen.

Zur Berechnung des Leistungsverhaltens erforderliche Daten können aus der Betriebssimulation übernommen werden:

---

<sup>21</sup>Planmäßige Wartezeiten können z.B. bei Anschlussgewährung auftreten und sind im Fahrplan festgeschrieben. Außerplanmäßigen Wartezeiten hingegen führen zu einer ungewollten Abweichung vom Fahrplan.

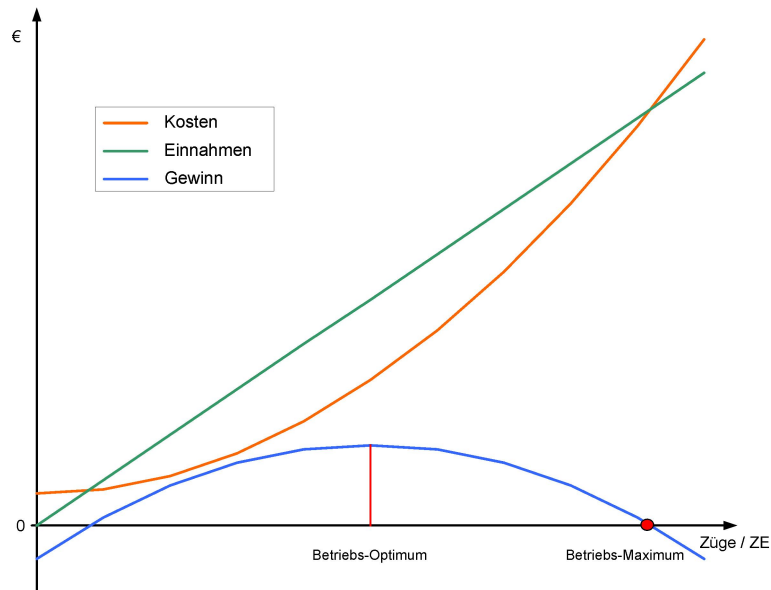


Abbildung 11: Finden des Betriebsoptimums, Auswertungen hinsichtlich der Trassenpreiseinnahmen und der Gewinnmaximierung

**Kosten:** Alle auf der Strecke verbauten Infrastrukturelemente werden mit ihren jeweiligen Kostensätzen versehen und über den Betrachtungszeitraum verteilt. Damit sind die periodisierten Fixkosten gegeben. Die Betriebserschwerungskosten lassen sich aus den entstehenden Verspätungsminuten ermitteln. Sie sind, sofern sie entstehen, als variable Kosten hinzuzurechnen.

**Einnahmen:** Die Einnahmen auf einer Strecke können nach dem Trassenpreissystem analog Kapitel 3.2.1 ermittelt werden.

Bei konstanter Zahl der Züge pro Zeiteinheit können nun verschiedene Infrastrukturvarianten hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit verglichen werden. Innerhalb einer Infrastrukturvariante kann die Zahl der pro Zeiteinheit fahrenden Züge schrittweise erhöht werden. In jeder Iteration werden Werte wie Verspätungsminuten und Fahrzeiten erfasst. Diese können wieder mit Kosten bewertet werden und dem Nutzen gegenübergestellt werden. Ein ausführliches Beispiel mit vier Infrastrukturvarianten wird in Kapitel 4.3.2 vorgestellt.

Es sei noch darauf hingewiesen, dass es mit diesem Verfahren nicht möglich ist, den absoluten Gewinn des EIU zu berechnen. In der Kostenfunktion werden nur die Aufwendungen für die Leit- und Sicherungstechnik sowie die Betriebserschwerungskosten betrachtet. Folglich fehlen solche, die für die übrige Infrastruktur (Gleise, Brücken, Tunnel, Bahnhöfe usw.) anfallen. Sie sind für eine vollständige Gewinner-

mittlung jedoch notwendig. Da in dieser Arbeit verschiedene Varianten von LST verglichen werden, bei denen die übrige Infrastruktur unverändert bleibt, kann diese als nicht entscheidungsrelevant angenommen werden. Folglich bleibt das absolute Gewinn-Niveau unbekannt, die Leistungsfähigkeit (Züge/t) kann aber trotzdem ermittelt werden.

### 3.3.3 Auswirkungen der LST auf Verspätungen

Ein weiteres interessantes Bewertungskriterium ist das Vermögen einer LST-Infrastrukturvariante, zum Abbau von extern entstandenen Verspätungen beitragen zu können. Hierzu wird in der Betriebssimulation zunächst die Störung eines Infrastrukturelements simuliert. Dadurch werden Züge an der Weiterfahrt gehindert — es entstehen Verspätungen. Es soll dann untersucht werden, wie schnell die Verspätungen wieder abgebaut werden können, nachdem die Störung beseitigt wurde. Je nach Leistungsfähigkeit einer LST-Variante kann dies unterschiedlich schnell erfolgen.

## 3.4 Qualitativ bewertbare Nutzenkriterien

Eine dritte Kategorie beschreibt Merkmale der Leit- und Sicherungstechnik, die sich nur qualitativ, d.h. nicht mit Hilfe von Zahlen, bewerten lassen. Die Berücksichtigung solcher Kriterien in der Wirtschaftlichkeitsanalyse ist sehr subjektiv und hängt in hohem Maße von der Sichtweise des Bearbeiters ab. Trotzdem können solche Kriterien zur Entscheidungsfindung beitragen und stellen somit einen wichtigen Teil der Wirtschaftlichkeitsanalyse dar.

Wichtige qualitative Merkmale sind in Tabelle 3, Seite 36 zusammengefasst. Die Bewertung der Merkmale erfolgt in Worten und hat das Ziel, verschiedene Varianten einer Maßnahme in eine Rangfolge zu bringen und vergleichen zu können. Eine Bewertung ist demzufolge nur möglich, wenn mehrere vergleichbare Varianten zur Verfügung stehen. Mit Hilfe der Erkenntnisse aus Kapitel 2.3.2 ist es möglich, die ordinal skalierten Aussagen in Zielerreichungsgrade umzurechnen. Ein Vorschlag zur Bewertung eines jeden Kriteriums ist in der Spalte Quantifizierung aufgeführt.

Die Daten für die Bewertung von qualitativen Merkmalen können nicht aus der Eisenbahnbetriebssimulation gewonnen werden, sondern müssen manuell in das EWA-



Kriterium	Beschreibung	Quantifizierung
Störungsmanagement	Möglichkeit, bei Betriebsabweichungen / Störungen schnell und effektiv zu reagieren (Begrenzung der Einbußen für EVU und Verminderung von Konventionalstrafen)	10-stufige Skala von sehr gut bis mangelhaft (vgl. Tabelle 1)
Kompatibilität / Migration	Infrastruktur soll möglichst vielen EVU Zugangsmöglichkeit ohne Umrüstung der Tfz bieten	10-stufige Skala von un- eingeschränkt kompatibel bis inkompatibel (vgl. Tabelle 1)
Kompatibilität Netz	Das betrachtete Teilnetz soll möglichst einfach an das bestehende Streckennetz angeschlossen werden	10-stufige Skala von un- eingeschränkt kompatibel bis inkompatibel (vgl. Tabelle 1)
Energieeinsparung für das EVU	Weniger Energieverbrauch durch homogeneres Fahren aufgrund der LST	10-stufige Skala von sehr hoch bis nicht vorhanden (vgl. Tabelle 1)
Rangieraufwand	Zeitverbrauch und Art der Handlungen für Einstellen und Auflösen der Rangierfahrstraßen in den Betriebsstellen.	Vorerst: Aussage, ob Rangieren möglich ist (ja/nein)
Überholen	Prüft die Fähigkeit der LST, das Überholen von Zügen zu ermöglichen	drei Zustände (ja/bedingt/nein)
Bauliche Flexibilität	Möglichkeit, nachträgliche Änderungen an der Gleisinfrastruktur durchführen zu können. Aufgrund der verwendeten Stellwerkstechnik kann dies mehr oder weniger problematisch sein.	5-stufige Skala von sehr hoch bis sehr niedrig (vgl. Tabelle 1)
Betriebliche Flexibilität	Umfasst die Flexibilität bei der Fahrplanerstellung, als auch die Flexibilität den Fahrplan kurzfristig ändern zu können (z.B. als Dispositionsmaßnahme). Die Flexibilität ist abhängig von der Bahnhofsgestaltung, den betrieblichen Regelungen und der Stellwerkstechnik.	binär (ja/nein)

Tabelle 3: Qualitativ bewertbare Nutzenkriterien und ihre Betrachtung in der Wirtschaftlichkeitsanalyse

Tool eingetragen werden. Um willkürliche Eintragungen, die die Vergleichbarkeit erschweren oder unmöglich machen, zu vermeiden, sollte die Bewertung der qualitativen Kriterien im EWA-Tool wie folgt gelöst werden:

In einer Liste möglicher zu bewertender Kriterien können diejenigen aktiviert werden, die in die Bewertung einfließen sollen. Ein Gewichtungsfaktor gibt die Relevanz eines jeden Kriteriums in der Nutzenbewertung an. Die Quantifizierung erfolgt über eine Menüliste mit fest voreingestellten Werten, beispielsweise einer Skala von sehr gut bis mangelhaft. Diese werden in der Software anschließend in Zielerreichungsgrade umgerechnet, vgl. Tabelle, 1, S. 15.

## **4 Anwendungsbeispiel für die erweiterte Wirtschaftlichkeitsanalyse**

Im Kapitel 3 wurden die Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsanalyse erörtert und auf die Besonderheiten von Leit- und Sicherungstechnik angewendet. In diesem Kapitel sollen nun die zuvor gewonnenen Erkenntnisse anhand einer Beispielstrecke angewendet werden. Dazu werden mehrere Infrastrukturvarianten einer Eisenbahnstrecke definiert und anschließend hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit und ihrer Kosten verglichen. Die hier durchgeführte Wirtschaftlichkeitsanalyse stellt detailliert dar, was später im EWA-Tool weitestgehend automatisiert erfolgen soll.

### **4.1 Untersuchungsgegenstand**

Damit die Wirtschaftlichkeitsanalyse für Eisenbahnunternehmen anhand eines Streckenbeispiels durchgeführt werden kann, muss zunächst der Untersuchungsgegenstand definiert werden. Hierzu wird mit Hilfe einer Eisenbahn-Betriebssimulations-Software ein Streckennetz erstellt, welches anschließend die Daten für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen liefert. In dieser Diplomarbeit wird RailSys in der Version 4.4 verwendet.

Der Untersuchungsgegenstand beschreibt einen ca. 33 km langer Gleisabschnitt, der zwei Ballungszentren verbindet. In der Ursprungsvariante (Ist-Zustand) ist die

Strecke größtenteils zweigleisig ausgebaut und wird über die gesamte Länge im Zweirichtungsbetrieb befahren. Die Streckentopologie in Abbildung 12 ist RailSys entnommen und zeigt den grundlegenden Ausbau der Infrastruktur.

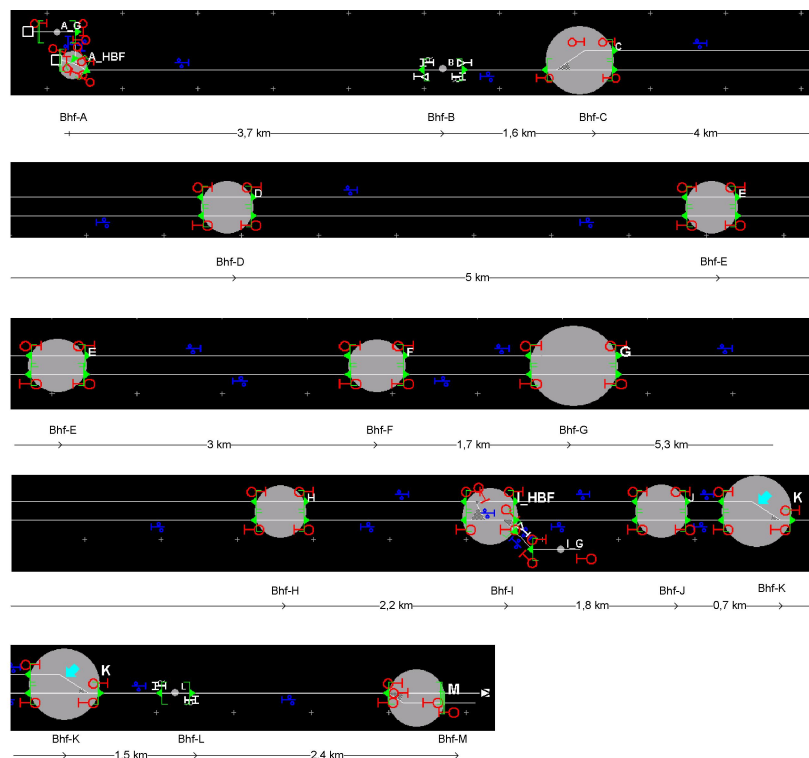


Abbildung 12: Topologie des Streckenbeispiels

Das betrachtete Streckennetz wird vorrangig von Nahverkehrszügen genutzt, die die beiden Ballungszentren, sowie die dazwischen liegenden Orte verbinden. Außerdem kann die Strecke von Güterzügen befahren werden. Fernverkehrs- und Hochgeschwindigkeitszüge sind im Regelbetrieb nicht vorgesehen. Diese können die Strecke im Bedarfsfall jedoch ebenfalls nutzen, beispielsweise bei Umleitungen oder Störungen auf den eigentlichen Fernverkehrsstrecken. Folgende Parameter, die in allen Ausbauvarianten unverändert bleiben, charakterisieren die Strecke:

- 33 km Streckenlänge
- Zweirichtungsbetrieb, vollständig elektrifiziert
- Nahverkehrsstrecke, kein Hochgeschwindigkeitsverkehr
- 13 Haltepunkte für Personenzüge
- sieben niveaugleiche Bahnübergänge

Nach der Konzernrichtlinie 413 [DB NETZ AG 2002] erfüllt die Strecke die Parameter der Streckenkategorie PN-Nahverkehrstakttrasse. Diese Information ist wich-

tig, damit zu einem späteren Zeitpunkt die Trassenpreiseinnahmen berechnet werden können.

Die auf der Strecke hauptsächlich verkehrenden Nahverkehrszüge pendeln zwischen den Bahnhöfen A und M in einem festgelegten Takt. Zusätzlich können einzelne Güterzüge die Strecke befahren. Diese können in den Bahnhöfen A, I und M beginnen und enden. Dabei ist das vorliegende Streckennetz keinesfalls als geschlossenes System zu verstehen. Die Philosophie von RailSys ermöglicht es, Züge an festgelegten Knotenpunkten in das zu betrachtende (Teil-)Netz einbrechen, bzw. daraus ausbrechen zu lassen. Somit ist es nicht erforderlich, für jeden Zug dessen gesamten Streckenverlauf abbilden zu müssen.

## 4.2 Modellierung von Szenarien

In der Untersuchung werden vier Varianten der Beispielstrecke verglichen. Sie werden in den nachfolgenden Unterkapiteln vorgestellt. Dabei wird auf technische Einzelheiten nicht zu detailliert eingegangen. Diese sind [SCHEPPAN 2006, S. 11-54 u. 129-130] entnommen und können dort ausführlicher nachvollzogen werden. Nach der Definition der Szenarien wurden diese mit Hilfe des Infrastrukturmanagers von RailSys erstellt.

### 4.2.1 Variante 1: Zugmeldeverfahren ohne Streckenblock

In der ersten Infrastrukturvariante wird die Strecke nach der Konzernrichtlinie 408 (Züge fahren und rangieren) [DB NETZ AG 2006], umgangssprachlich dem Zugmeldeverfahren, betrieben. Die Konzernrichtlinie 408 ist seit mehreren Jahrzehnten das maßgebliche Regelwerk für den Eisenbahnbetrieb auf öffentlichen Strecken in Deutschland und liegt derzeit in aktueller Version vom Juni 2006 vor.

Kerngedanke des Zugmeldeverfahrens ist die Besetzung eines jeden Bahnhofs mit einem Fahrdienstleiter, der Informationen über abfahrtsbereite Züge an den Fahrdienstleiter des nachfolgenden Bahnhofes fernmündlich weitergibt (meldet) und ebenso Informationen über ankommende Züge vom vorgelagerten Bahnhof entgegennimmt.

Das Verfahren ist sehr personalintensiv. Die technische Ausrüstung der Strecke ist jedoch recht einfach gehalten. Neben 15 ausschließlich mechanisch betriebenen Stellwerken gibt es keinen Streckenblock. Das bedeutet, dass die Strecke zwischen

zwei Bahnhöfen als ein Block definiert ist und sich folglich nur ein Zug zwischen zwei Bahnhöfen befinden darf (vgl. Kap. 2.1.2).

Die Variante 1 stellt somit eine Ursprungsvariante mit veralteter Technik und begrenzter Leistungsfähigkeit dar, zu der Alternativen gefunden werden sollen.

#### 4.2.2 Variante 2: Signalisierter Zugleitbetrieb (SZB-E)

In der zweiten Variante soll ein moderneres Betriebsverfahren angewendet werden, das für den Betrieb von eingleisigen Nebenstrecken entwickelt wurde — der signalisierte Zugleitbetrieb mit elektronischem Stellwerk (SZB-E). Die Prämisse der Eingleisigkeit erfordert einen Umbau des zweigleisigen Streckenabschnittes, wie er in Abbildung 13 dargestellt ist. Zugkreuzungen, welche mit Hilfe von automatischen Rückfallweichen realisiert werden, sind in jedem Bahnhof möglich.

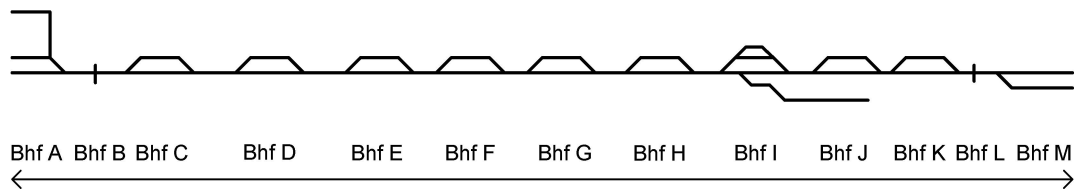


Abbildung 13: eingleisige Streckentopologie des Untersuchungsbeispiels in den Varianten SZB-E und TuZ (Zugleitbetrieb) schematisch dargestellt

Für dieses Betriebsverfahren ist es nicht erforderlich, dass alle Bahnhöfe mit Fahrdienstleitern besetzt sind. An deren Stelle tritt ein Zugleiter, der die Zugläufe auf der gesamten Strecke und nicht nur im örtlichen Bahnhof überwacht. Triebfahrzeuge und Strecke müssen mit der für die Überwachung notwendigen Technik ausgestattet sein. Der Zugleiter beaufsichtigt den Betrieb an einem Computer-Arbeitsplatz.

Der signalisierte Zugleitbetrieb ist eine Weiterentwicklung des ursprünglichen Zugleitbetriebes, bei dem weder Block- und Fahrstraßensicherung (u.a. Signaleinrichtungen), noch Zugbeeinflussungsanlagen vorgesehen sind. Der SZB-E ermöglicht eine höhere Geschwindigkeit ( $v_{\max} = 100 \text{ km/h}$  statt  $80 \text{ km/h}$ ) und bietet ein höheres Sicherheitsniveau gegenüber dem herkömmlichen SZB. Der Einsatz von elektronischen Komponenten in der LST ermöglicht einen höheren Grad der Zentralisierung der Betriebsführung und führt somit zu geringerem Personalbedarf.

### **4.2.3 Variante 3: Technisch unterstützter Zugleitbetrieb (TuZ)**

Der technisch unterstützte Zugleitbetrieb ist ebenfalls eine Weiterentwicklung des Zugleitbetriebes, der von der Tiefenbach GmbH entwickelt wurde. Die Gleise sind wie beim SZB-E mit Zugbeeinflussungsanlagen und Achszählern ausgestattet. Signaleinrichtungen sind jedoch nicht vorhanden.

Die Topologie der Strecke ist identisch mit der vorigen Variante. Für den TuZ sind geringe Investitionskosten charakteristisch. Allerdings wird die Leistungsfähigkeit auf Grund der fehlenden Block- und Fahrstraßensicherung als geringer eingeschätzt.

### **4.2.4 Variante 4: Zugmeldeverfahren mit elektronischem Stellwerk**

Die letzte Infrastrukturvariante stellt den Umbau der ursprünglichen Strecke (vgl. Abbildung 12) mit Hilfe moderner Technik dar. Anstelle der 15 mechanischen Stellwerke kann der Betrieb von einer Betriebsleitstelle mit einem elektronischen Stellwerk aus gesteuert werden. Eine vollständige Ausrüstung mit Kombinationssignalen<sup>22</sup> und Block- und Fahrstraßensicherung ermöglichen eine hohe Leistungsfähigkeit, ist aber auch mit erheblichen Investitionskosten verbunden. Kosteneinsparungen werden vor allem in den Betriebskosten durch die zentralisierte Betriebsführung erwartet.

## **4.3 Kosten-Erlös-Rechnung**

### **4.3.1 Berechnung der Lebenszykluskosten**

Nach Modellierung der vier Varianten in RailSys liegen detaillierte Daten für alle Elemente der jeweils notwendigen Leit- und Sicherungstechnik vor. Für eine möglichst genaue Berechnung im EWA-Tool ist es wichtig, dass die Daten in mikroskopischer Form vorliegen. Zwei gleichartige Infrastrukturelemente haben nicht zwangsläufig die gleiche Kostenstruktur. Daher soll jedes Element einzeln betrachtet und ein Zusammenfassen von Elementen vermieden werden.

Die Daten konnten für die Weiterbearbeitung in das Microsoft-Excel-Format konvertiert werden. Hier erfolgte die Berechnung der Lebenszykluskosten. Um einen

---

<sup>22</sup>Ks-System: modernes Signalsystem, bei dem ein Hauptsignal gleichzeitig die Funktion des nachfolgenden Vorsignals hat; kommt bei allen Neubauprojekten der DB AG zum Einsatz

Überblick zu geben, zeigt die folgende Übersicht, welche Infrastrukturelemente aus RailSys zur Berechnung der LCC exportiert wurden:

Elementetyp	Variante 1 MSTW	Variante 2 SZB-E	Variante 3 TuZ	Variante 4 ESTW
Achszähler	32	132	65	148
Gleisstromkreise	30	—	—	—
Vorsignale	25	30	4	—
Hauptsignale	58	83	25	106
Weichenantriebe	7	8	8	7
Rückfallweichen	—	16	16	—
Haltetafeln	4	1	21	1
Trapeztafeln	4	1	21	1
MSTW	15	—	—	—
ESTW (Anzahl STE)	—	1 (121)	1 (37)	1 (113)
PZB-Magnete	141	117	99	212
Bahnübergangsanlagen	7	7	7	7

Tabelle 4: Menge der Infrastrukturelemente, die je nach Ausbauvariante in die LCC-Berechnung einfließen, Angaben in Stück

Die Infrastrukturelemente wurden händisch um ihre Eigenschaften (z.B. Anschaffungskosten, Betriebskosten, Personalbedarf in Stellwerken, Instandhaltungsintervalle usw.) ergänzt, so dass die Lebenszykluskosten für alle Varianten berechnet werden konnten. Dabei wurden die folgenden Parameter als einheitlich definiert:

- Der Betrachtungszeitraum wird auf 20 Jahre festgelegt.
- Pro Jahr werden 365 Betriebstage unterstellt.
- Der kalkulatorische Zinssatz beträgt 8%.
- Die Inflation wird mit 1,5% pro Jahr berücksichtigt.

Da die Variante MSTW als die bereits existierende Variante definiert ist, muss in den übrigen Varianten beachtet werden, dass einige Infrastrukturelemente schon vorhanden sind und auch weiterverwendet werden können. So sind in der Variante SZB-E beispielsweise nur 100 Achszähler neu zu beschaffen, es müssen aber die Besitzkosten für 132 Stück über den Betrachtungszeitraum berechnet werden. Bei der Betrachtung der Vorsignale in Variante TuZ ist beispielsweise zu erkennen, dass vier anstelle von 25 Stück benötigt werden. Somit sind 21 Vorsignale zurückzubauen, also mit Rückbaukosten zu belegen.

Das Berechnen der Differenzen zwischen den Varianten erfordert einen hohen manuellen Aufwand und kann bei großen Projekten schnell unübersichtlich werden. Im EWA-Tool soll die Berechnung von Unterschieden zwischen Varianten daher automatisch möglich sein.

In der Auswertung der Anschaffungs-, Betriebs- und Instandhaltungskosten, welche in Abbildung 14 dargestellt ist, werden die Unterschiede zwischen den vier Varianten deutlich. Bei Betrachtung der Anschaffungskosten erscheint das Szenario MSTW optimal, da die bestehende Infrastruktur unverändert weiterbetrieben werden kann. Diese Variante weist andererseits sehr hohe Betriebskosten auf, welche hauptsächlich durch die personalintensive Betriebsführung verursacht werden. Außerdem erfordert die mechanische Technik einen höheren Instandhaltungsaufwand. Beim Szenario TuZ ist auffällig, dass es sowohl die geringsten Anschaffungs- als auch die geringsten Besitzkosten aufweist. Das Szenario ESTW erfordert die höchsten Anschaffungskosten, ist bei Betrieb und Instandhaltung aber mit dem Szenario SZB-E vergleichbar.

Zum abschließenden Vergleich sind die Lebenszykluskosten der Szenarien über den Betrachtungszeitraum in Tabelle 5 gegenübergestellt:

<b>Variante 1</b> <b>MSTW</b>	<b>Variante 2</b> <b>SZB-E</b>	<b>Variante 3</b> <b>TuZ</b>	<b>Variante 4</b> <b>ESTW</b>
52.349.084	31.037.531	13.610.264	41.178.447

Tabelle 5: Gegenüberstellung der Lebenszykluskosten für die Leit- und Sicherungstechnik der vier Szenarien, Angaben in Euro

Die großen Unterschiede zwischen den Szenarien sind auffällig. Die Variante MSTW besitzt die höchsten Lebenszykluskosten, wiederum durch die hohen Personalkosten verursacht. Die Varianten 2 und 4 liegen im Mittelfeld. Hohe Investitionskosten sind hier die Hauptursache. Die Variante 3 hat die geringsten Lebenszykluskosten. Sie hat geringe Besitzkosten, stellt aber auch eine technische Minimalvariante dar.

#### 4.3.2 Berechnung der Erlöse durch Trassenpreise

Die alleinige Betrachtung der Lebenszykluskosten lässt noch keine Rückschlüsse auf die Vorteilhaftigkeit einer Investition zu. Daher sollen nun die Trassenpreiseinnahmen für die Szenarien berechnet und den Kosten gegenübergestellt werden. Somit wird



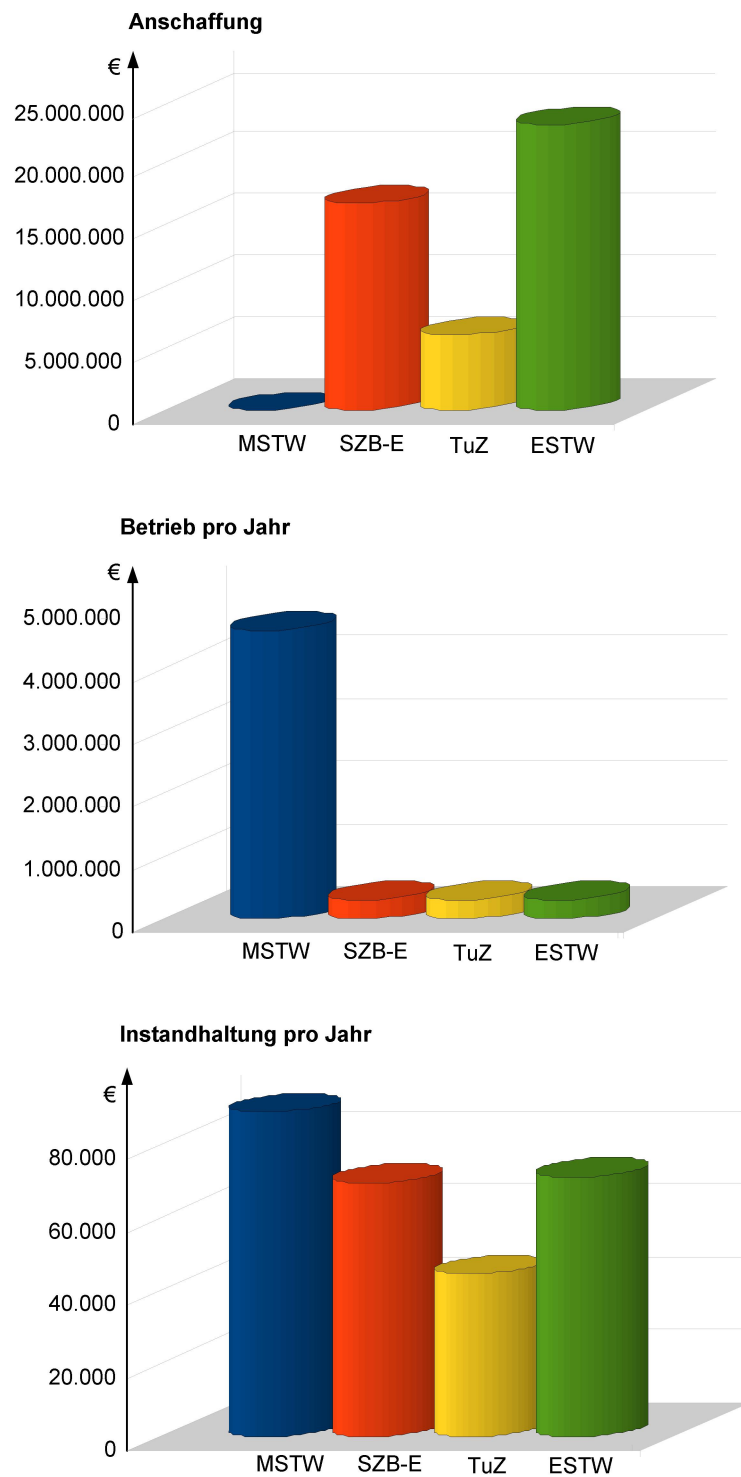


Abbildung 14: Auswertung und Vergleich der Anschaffungs-, Betriebs- und Instandhaltungskosten der Szenarien

dem EIU eine Entscheidungshilfe bei der Wahl der vorteilhaftesten Alternative zur Verfügung gestellt.

Wie hoch die Trassenpreiseinnahmen sein werden, hängt vom Fahrplan und somit von der Zahl der vergebenen Zugtrassen ab. In Kapitel 3.3.2 wurde bereits überlegt, wie das Betriebsoptimum, d.h. die optimale Menge an vergebenen Zugtrassen zu bestimmen ist. Um diesen Ansatz am betrachteten Streckenbeispiel anwenden zu können, wurden in einem ersten Schritt identische Fahrpläne für die vier Szenarien erstellt und im Fahrplan-Manager von RailSys eingegeben.

Die Fahrpläne umfassen den Regionalpendelverkehr zwischen den beiden Ballungszentren (Bahnhöfe A und M). Die zum Einsatz kommenden Fahrzeuggarnituren bestehen aus einer Elektrolokomotive der Baureihe 143 sowie je drei Doppelstock-Personenzugwagen.

Zur näherungsweisen Bestimmung der Leistungsgrenzen wurden Fahrpläne mit einem 60-, 30-, 20-, 15- und 10-Minuten-Takt in den Hauptverkehrszeiten und aufsteigender bzw. abfallender Tagesganglinie in den Morgen- und Abendstunden erstellt. Somit wurden 20 Simulationsdurchläufe (4 Szenarien á 5 Fahrplanversionen) in RailSys durchgeführt. Abhängig vom Fahrplantakt sind folgende Fahrplantrassen vom EIU pro Betriebstag für die Bedienung der Relation in beiden Fahrtrichtungen zu vergeben:

Takt (min)	Zugtrassen/Tag
60	40
30	78
20	100
15	162
10	236

Tabelle 6: Zahl der Zugtrassen je Betriebstag

**4.3.2.1 Ermittlung der Trassenpreiseinnahmen** Die Trassenpreiseinnahmen werden, wie im Kapitel 3.2.1 beschrieben, gemäß dem Trassenpreissystem der DB Netz AG berechnet. Folgende Einnahmen sind in der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung nach der Formel 7 für eine vergebene Zugtrasse zu kalkulieren:

**Für die Szenarien 1 und 4:**

$$\begin{aligned}
 & (2,18 \text{ Euro} \cdot 1,65 \text{ Euro} \cdot 1 \cdot 1 + 0 + 0) \text{ 12,55 km} \\
 + & (2,53 \text{ Euro} \cdot 1,65 \text{ Euro} \cdot 1 \cdot 1 + 0 + 0) \text{ 8,33 km} \\
 + & (2,53 \text{ Euro} \cdot 1,65 \text{ Euro} \cdot 1 \cdot 1 + 0 + 0) \text{ 7,84 km} \\
 + & (2,18 \text{ Euro} \cdot 1,65 \text{ Euro} \cdot 1 \cdot 1 + 0 + 0) \text{ 9,59 km} \quad = 126,08 \text{ Euro}
 \end{aligned}$$

**Für die Szenarien 2 und 3:**

$$\begin{aligned}
 & (2,18 \text{ Euro} \cdot 1,65 \text{ Euro} \cdot 1 \cdot 1 + 0 + 0) \text{ 12,55 km} \\
 + & (2,18 \text{ Euro} \cdot 1,65 \text{ Euro} \cdot 1 \cdot 1 + 0 + 0) \text{ 8,33 km} \\
 + & (2,18 \text{ Euro} \cdot 1,65 \text{ Euro} \cdot 1 \cdot 1 + 0 + 0) \text{ 7,84 km} \\
 + & (2,18 \text{ Euro} \cdot 1,65 \text{ Euro} \cdot 1 \cdot 1 + 0 + 0) \text{ 9,59 km} \quad = 119,65 \text{ Euro}
 \end{aligned}$$

**4.3.2.2 Finden der optimalen Menge an Zugtrassen** Es liegen nun alle erforderlichen Daten zur näherungsweisen Bestimmung des Betriebsoptimums vor. Aus der Eisenbahn-Betriebssimulation werden die für einen Betriebstag anfallenden Verspätungsminuten übertragen. Sie sind für die Berechnung der Betriebserschwerungskosten, die das EIU bei Überlastung der Strecke an das betroffene EVU zu zahlen hat, erforderlich. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Abbildungen 15 bis 18 grafisch dargestellt sowie in Tabelle 7 zusammengefasst.

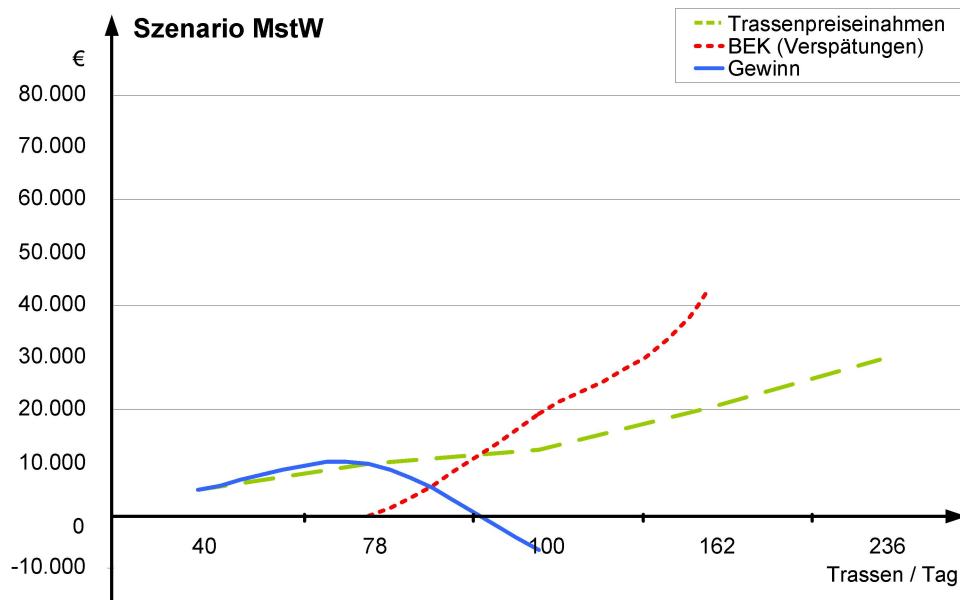


Abbildung 15: Betriebsoptimum im Szenario MSTW: Der maximale Ertrag wird bei einem 30-Minuten-Takt erzielt.

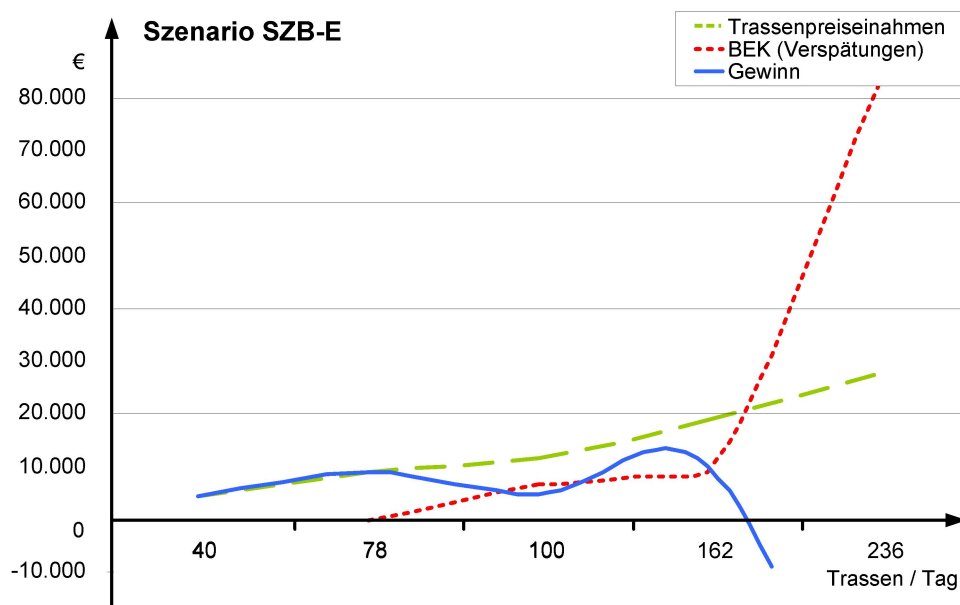


Abbildung 16: Betriebsoptimum im Szenario SZB-E: Der maximale Ertrag wird bei einem 15-Minuten-Takt erzielt.

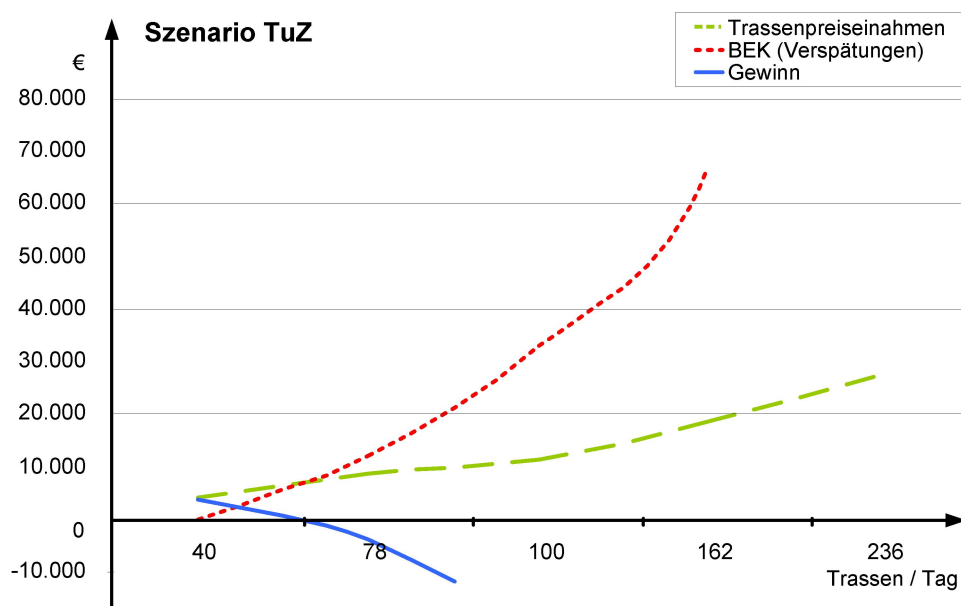


Abbildung 17: Betriebsoptimum im Szenario TuZ: Der maximale Ertrag wird bei einem 60-Minuten-Takt erzielt.

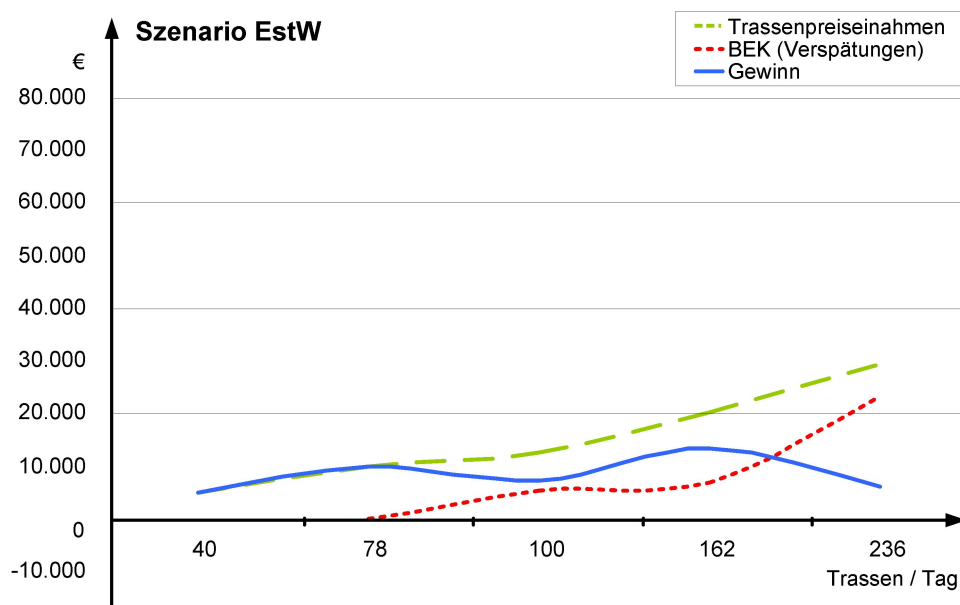


Abbildung 18: Betriebsoptimum im Szenario ESTW: Der maximale Ertrag wird bei einem 15-Minuten-Takt erzielt.

Szenario	Takt (min)	Verspätungen (min)	BEK (Euro)	Gewinn (Euro)
MSTW	60	0	0	5.043,20
	30	0	0	9.834,24*
	20	1.282	19.230,00	-6.622,00
	15	2.890	43.350,00	-22.925,04
	10	8.325	12.4875,00	-95.120,12
SZB-E	60	0	0	4.786,00
	30	0	0	9.332,70
	20	463	6.945,00	5.020,00
	15	603	9.045,00	10.338,30*
	10	5.533	82.995,00	-54.757,60
TuZ	60	34	510,00	4.276,00*
	30	844	12.660,00	-3.327,30
	20	2.267	34.005,00	-22.040,00
	15	4.554	68.310,00	-48.926,70
	10	14.550	218.250,00	-190.012,60
ESTW	60	0	0	5.043,20
	30	0	0	9.834,24
	20	359	5.385,00	7.223,00
	15	469	7.035,00	13.389,96*
	10	1.574	23.610,00	6.144,88

Tabelle 7: Trassenpreiserlöse und Betriebserschwerniskosten pro Tag unter Berücksichtigung verschiedener Fahrplanversionen

Daraus lässt sich nun für jedes Szenario die Fahrplanversion bestimmen, die für das Eisenbahninfrastrukturunternehmen am vorteilhaftesten erscheint. Die im Streckenbeispiel als vorteilhaft angesehenen Fahrplanversionen, also diejenigen, die dem EIU den höchsten Gewinn erwirtschaften, sind in der Tabelle 7 mit einem Stern gekennzeichnet. Für diese können die entsprechenden Erlöse auf den Wert pro Jahr (bei 365 Betriebstagen pro Jahr) umgerechnet werden und mit den Kosten pro Jahr in Relation gesetzt werden. Damit lässt sich der Kapitalwert einer jeden Investitionsalternative berechnen und somit die Kosten-Erlös-Rechnung abschließen. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 19 zusammengefasst. Sie werden nachfolgend im Rahmen einer Nutzwertanalyse weiter Verwendung finden.

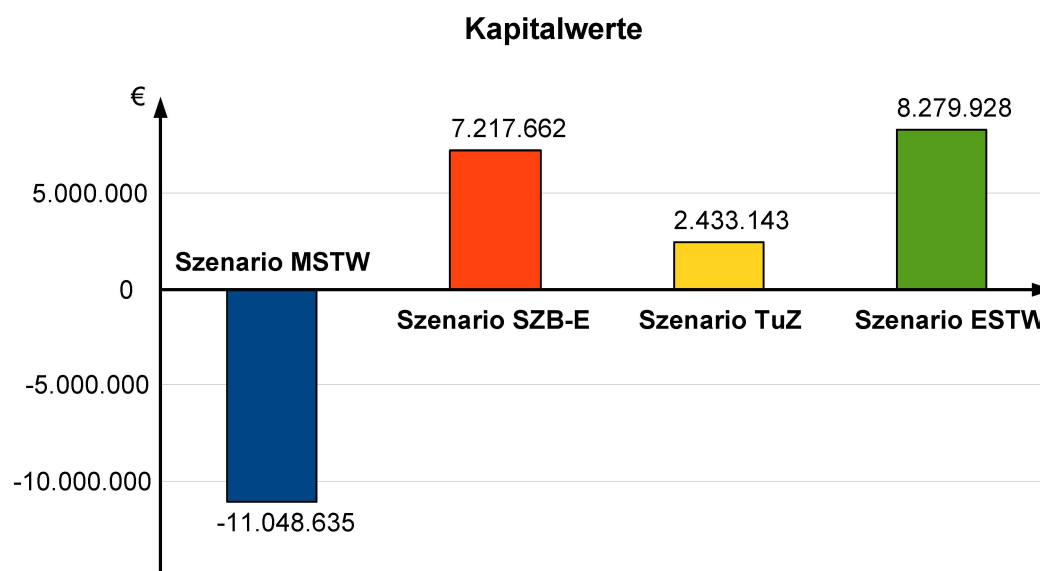


Abbildung 19: Kapitalwerte im Vergleich

In der Auswertung wird deutlich, dass das Szenario MSTW nicht kostendeckend betrieben werden kann. Wie die Auswertung des Betriebsoptimums gezeigt hat, führt eine Leistungssteigerung nicht zu mehr Kostendeckung, da die vom Eisenbahninfrastrukturunternehmen zu zahlenden Betriebserscherniskosten überproportional steigen. Langfristig sollte der Infrastrukturbetreiber über eine Neuinvestition nachdenken.

Die Szenarien SZB-E und ESTW ermöglichen eine hohe Kostendeckung bei gleichzeitig hoher Leistungsfähigkeit (Gewinnmaximum bei 15-Minuten-Takt). Hier muss sich der Betreiber die Frage stellen, ob diese Leistung überhaupt erforderlich ist bzw. ob sie zukünftig im Betrachtungszeitraum erforderlich werden kann.

Im Szenario TuZ erwirtschaftet die Leit- und Sicherungstechnik ebenfalls ein positives Ergebnis, allerdings bei einem maximalen Takt von 60 Minuten. Sollte der Infrastrukturbetreiber versuchen, eine höhere Nachfrage nach Zugtrassen zu befriedigen, kann sich diese Lösung schnell zum Kostentreiber entwickeln. Im Vergleich zu den Szenarien SZB-E und ESTW ist der Gewinn außerdem geringer.

Zu beachten ist für alle Szenarien, dass die berechneten Kapitalwerte, wie bereits im Kapitel 3.3.2 erwähnt wurde, kein absolutes Ergebnis darstellen, weil nur die Leit- und Sicherungstechnik betrachtet wird und die weitere Infrastruktur unbewertet bleibt. Unter dieser Maßgabe ändern sich die absoluten Kapitalwerte, die Verhältnisse zwischen den Szenarien bleiben jedoch unverändert.

## 4.4 Nutzwertanalyse

Die im Kapitel 4.3 durchgeführte Kosten-Erlös-Rechnung konnte einen ersten Überblick über die Vorteilhaftigkeit der verschiedenen Infrastruktur-Varianten geben. Es wurden ausschließlich monetär bewertbare Größen berechnet, um Aussagen zur Wirtschaftlichkeit der Alternativen treffen zu können. Eine eindeutige Vorzugsvariante konnte jedoch noch nicht bestimmt werden. Deshalb wird nun eine Nutzwertanalyse durchgeführt, in der nichtmonetäre (qualitative und quantitative) Nutzenkriterien berücksichtigt werden. Damit werden die Gebrauchseigenschaften der vier Szenarien genauer beschrieben und verglichen. Anschließend werden die Erkenntnisse aus der Kosten-Erlös-Rechnung und der Nutzwertanalyse in der erweiterten Wirtschaftlichkeitsanalyse (EWA) zusammengefasst.

### 4.4.1 Festlegen der Nutzenkriterien

Zunächst sind die nichtmonetären Kriterien zu erfassen und zu Ergebnisgrößen zusammenzustellen. Mögliche Ergebnisgrößen wurden in den Kapiteln 3.3 und 3.4 bereits definiert. Welche davon in die hier durchgeführte Nutzwertanalyse einfließen, kann der Tabelle 8 entnommen werden. Um eine sinnvolle Auswertung zu erhalten, wurden die Ergebnisgrößen je nach Relevanz für Eisenbahninfrastrukturunternehmen bzw. Eisenbahnverkehrsunternehmen separiert.

Ergebnisgrößen	Szenario MSWT	Szenario SZB-E	Szenario TuZ	Szenario ESTW
<b>Für EIU</b>				
max. Belegungsgrad (%)	9,33	11,00	8,82	15,88
Störungsmanagement	sehr gut	befriedigend	befriedigend	befriedigend
Mindestzugfolgezeit (s)	222,5	574	234	86
Leistungsfähigkeit einer Strecke ( <i>opt. Menge Zugtrassen / Zeiteinheit</i> )	4	8	2	8
Kompatibilität Netz	gut	befriedigend	befriedigend	sehr gut
Bauliche Flexibilität	ausreichend	befriedigend	befriedigend	gut
Betriebliche Flexibilität	ja	nein	nein	ja
<b>Für EVU</b>				
Fahrzeit ( <i>min</i> )	39,12	38,57	62,53	37,22
Abbaubarkeit von Verspätungen (s)	770,52	720,33	811,52	770,52
Streckenhöchstgeschwindigkeit ( <i>km/h</i> )	120	100	80	120
Kompatibilität / Migration	gut	befriedigend	befriedigend	sehr gut
Energieverbrauch ( <i>kW/h</i> )	110,474	108,270	38,562	125,132
Umlauf der Fahrzeuge ( <i>erford. Fzg./Betriebstag</i> )	4	7	2	7

Tabelle 8: Ergebnisgrößen, die in der Nutzwertanalyse berücksichtigt werden, und deren Ausprägungen in den betrachteten Szenarien



Im Anschluss erfolgt das Zusammentragen der Werte aller Ergebnisgrößen. Fast alle quantitativen Kriterien konnten direkt aus der Eisenbahn-Betriebsimulation exportiert werden. Eine Ausnahme stellt die Größe *Umlauf der Fahrzeuge* dar. Ihre Berechnung erfolgte gesondert. Das Vorgehen wird detailliert im Kapitel 5 beschrieben.

Einen zweiten Sonderfall bildet die Größe *Abbaubarkeit von Verspätungen*, also das Vermögen einer Infrastrukturvariante, aufgelaufene Verspätungen schnellstmöglich abbauen zu können (vgl. Kap. 3.3.3). Sie kann nicht direkt aus der Eisenbahn-Betriebsimulation exportiert werden. Es war erforderlich, eine Störung zu simulieren. Dazu wurde eine einstündige Streckensperrung am Bahnhof D zwischen 10:00 und 11:00 Uhr eingerichtet. Die Eisenbahn-Betriebsimulation errechnet selbständig die durch die Störung entstandenen Verspätungsminuten aller betroffenen Fahrzeuge inklusive der Folgeverspätungen.

#### 4.4.2 Berechnung & Gewichtung der Zielerreichungsgrade

Um nun sämtliche quantitativen Kriterien, die in verschiedenen Einheiten bemessen werden, vergleichbar zu machen, ist die Ermittlung der Zielerreichungsgrade (fz) erforderlich. Die Umrechnung erfolgt gemäß der Gleichung 1 und sei hier anhand des Belegungsgrades exemplarisch dargestellt. Die Umrechnung der übrigen quantitativen Ergebnisgrößen erfolgt analog:

$$fz_{B,1} = \frac{10 - 0}{15,88 - 8,82} \cdot (9,33 - 8,82) = 0,72 \approx 1$$

$$fz_{B,2} = \frac{10 - 0}{15,88 - 8,82} \cdot (11,00 - 8,82) \approx 3$$

$$fz_{B,3} = \frac{10 - 0}{15,88 - 8,82} \cdot (8,82 - 8,82) = 0$$

$$fz_{B,4} = \frac{10 - 0}{15,88 - 8,82} \cdot (15,88 - 8,82) = 10$$

Die qualitativen Ergebnisgrößen müssen hingegen in einem stark von Subjektivität geprägten Prozess vom Anwender bewertet werden. Die Umrechnung der Größen in Zielerreichungsgrade wird anschließend mit Hilfe der Angaben aus Tabelle 1 un-

ter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Quantifizierung (der Tabelle 3 zu entnehmen) durchgeführt.

Außer den nicht monetär zu bewertenden Gebrauchseigenschaften sollen auch die im vorangehenden Abschnitt ermittelten Kapitalwerte aus der Kosten-Erlös-Rechnung als monetäre Ergebnisgrößen in der Nutzwertanalyse berücksichtigt werden. Diese sind mit Hilfe der Formel 2 in Zielerreichungsgrade umzurechnen:

$$fz(1) := 0, \text{ da Barwert negativ}$$

$$fz(2) = 10 - \left( \frac{8.279.928}{7.217.662} - 1 \right) \cdot 10 \approx 9$$

$$fz(3) = 10 - \left( \frac{8.279.928}{2.433.143} - 1 \right) \cdot 10 = 0$$

$$fz(4) = 10 - \left( \frac{8.279.928}{8.279.928} - 1 \right) \cdot 10 = 10$$

Sämtliche Zielerreichungsgrade sind in der Entscheidungsübersicht in Tabelle 9 zusammengefasst. Daraus ist außerdem bereits die Gewichtung der einzelnen Ergebnisgrößen abzulesen, welche vom Anwender des EWA-Tools vorzunehmen ist. Aus dem subjektiven Blickfeld des Entscheiders entstehend, kann die Gewichtung das Ergebnis der Nutzwertanalyse stark beeinflussen. Sie erfordert ein entsprechendes Fachwissen und muss mit besonderer Aufmerksamkeit vorgenommen werden.

Da in dieser Nutzwertanalyse die Eigenschaften der Infrastruktur betrachtet werden und diese in erster Linie vom Eisenbahninfrastrukturunternehmen bestimmt werden, wird das Verhältnis der Gebrauchseigenschaften EIU : EVU mit  $\Delta_i : \Delta_v = 70 : 30$  festgelegt. Darüber hinaus wird der Wirtschaftlichkeit einer Alternative eine große Bedeutung unter allen Nutzenkriterien zugemessen, so dass das Verhältnis Wirtschaftlichkeit : Gebrauchseigenschaften mit  $\Delta_w : \Delta_g = 40 : 60$  berücksichtigt wird.

#### 4.4.3 Nutzwertberechnung und Darstellung der Ergebnisse

In der abschließenden Berechnung der Nutzwerte aller Szenarien müssen alle Teilnutzwerte, die sich aus den Zielerreichungsgraden sowie deren Gewichtungen ergeben haben, zusammengefasst werden. Die festgestellten Zielerreichungsgrade werden also

	Gewichtung		Ergebnisgrößen	Szenario MSWT	Szenario SZB-E	Szenario TuZ	Szenario ESTW
Wirtschaftlichkeit	40%		Kapitalwert	0	9	0	10
Gebrauchseigenschaften EIU	60%	70%	Belegungsgrad	1	3	0	10
			Störungsmanagement	10	5	5	5
			Mindestzugfolgezeit	7	0	7	10
			Leistungsfähigkeit einer Strecke	3	10	0	10
			Kompatibilität Netz	8	5	5	10
			Bauliche Flexibilität	2	3	3	4
			Betriebliche Flexibilität	10	0	0	10
EVU		30%					
			Fahrzeit	9	9	0	10
			Abbaubarkeit von Verspätungen	4	10	0	4
			Streckenhöchstgeschwindigkeit	10	5	0	10
			Kompatibilität / Migration	8	5	5	10
			Energieverbrauch	2	2	10	0
			Umlauf der Fahrzeuge	6	0	10	0
$\Sigma$	100%	100%	100%				

Tabelle 9: Entscheidungsübersicht 1 — Darstellung der untersuchten Ergebnisgrößen sowie deren Ausprägungen in Form von Zielerreichungsgraden und Angabe einer möglichen Gewichtung

mit ihren Gewichtungsfaktoren multipliziert. Anschließend werden die Teilnutzwerte zum Nutzwert einer Alternative addiert. [vgl. HOFFMEISTER 2000, S. 296]

Für die Gebrauchseigenschaften der Eisenbahninfrastrukturunternehmen sind für die Szenarien zu berechnen:

$$\begin{aligned}
 fz_{(EIU,1)} &= 0,21 \cdot 1 + 0,11 \cdot 10 + 0,14 \cdot 7 + 0,2 \cdot 3 \\
 &\quad + 0,10 \cdot 8 + 0,14 \cdot 2 + 0,10 \cdot 10 \\
 &= 0,21 + 1,14 + 0,98 + 0,60 + 1,12 + 1,00 \approx 5,0 \\
 fz_{(EIU,2)} &= 0,21 \cdot 3 + 0,11 \cdot 5 + 0,14 \cdot 0 + 0,2 \cdot 10 \\
 &\quad + 0,10 \cdot 5 + 0,14 \cdot 3 + 0,10 \cdot 0 \\
 &= 0,63 + 0,55 + 0 + 2,00 + 0,50 + 0,42 + 0 \approx 4,0 \\
 fz_{(EIU,3)} &= 0,21 \cdot 0 + 0,11 \cdot 5 + 0,14 \cdot 7 + 0,2 \cdot 0 \\
 &\quad + 0,10 \cdot 5 + 0,14 \cdot 3 + 0,10 \cdot 0 \\
 &= 0 + 0,55 + 1,00 + 0 + 0,50 + 0,42 + 0 \approx 2,5 \\
 fz_{(EIU,4)} &= 0,21 \cdot 10 + 0,11 \cdot 5 + 0,14 \cdot 10 + 0,2 \cdot 10 \\
 &\quad + 0,10 \cdot 10 + 0,14 \cdot 4 + 0,10 \cdot 10 \\
 &= 2,14 + 0,55 + 1,43 + 2,00 + 1,00 + 0,56 + 1,00 \approx 8,6
 \end{aligned}$$

Die Gebrauchseigenschaften der Eisenbahnverkehrsunternehmen lassen sich analog zusammenfassen:

$$\begin{aligned}
 fz_{(EVU,1)} &= 0,3 \cdot 9 + 0,26 \cdot 4 + 0,1 \cdot 10 + 0,07 \cdot 8 + 0,10 \cdot 2 + 0,17 \cdot 6 \\
 &= 2,7 + 1,04 + 1,00 + 0,56 + 0,20 + 1,02 \approx 6,7 \\
 fz_{(EVU,2)} &= 0,3 \cdot 9 + 0,26 \cdot 10 + 0,1 \cdot 5 + 0,07 \cdot 5 + 0,10 \cdot 2 + 0,17 \cdot 0 \\
 &= 2,7 + 2,60 + 0,50 + 0,35 + 0,20 + 0 \approx 6,5 \\
 fz_{(EVU,3)} &= 0,3 \cdot 0 + 0,26 \cdot 0 + 0,1 \cdot 0 + 0,07 \cdot 5 + 0,10 \cdot 10 + 0,17 \cdot 10 \\
 &= 0 + 0 + 0 + 0,35 + 1,00 + 1,70 \approx 3,0 \\
 fz_{(EVU,4)} &= 0,3 \cdot 10 + 0,26 \cdot 4,5 + 0,1 \cdot 10 + 0,07 \cdot 10 + 0,10 \cdot 0 + 0,17 \cdot 0 \\
 &= 3,0 + 1,17 + 1,00 + 0,70 + 0 + 0 \approx 5,9
 \end{aligned}$$

Diese Werte können nun in die Entscheidungsübersicht 2 (Tabelle 10) in den Zeilen zu den Gebrauchseigenschaften eingetragen werden. In der Zeile Wirtschaftlichkeit fließen die Zielerreichungsgrade aus der Kosten-Erlös-Rechnung aus Entscheidungsübersicht 1 unverändert ein.

Nun lässt sich der Gesamtnutzwert  $NW_{ges}$  nach der folgenden Gleichung berechnen:

$$NW_{ges} = \Delta_w \cdot fz_w + \Delta_g (\Delta_i \cdot fz_{EIU} + \Delta_v \cdot fz_{EVU})$$

Für die vier Szenarien ergibt dies:

$$\begin{aligned} NW_{ges,1} &= 40 \cdot 0 + 60 \cdot (0,7 \cdot 5,0 + 0,3 \cdot 6,7) = 0 + 60 \cdot (3,5 + 2,04) = 331 \\ NW_{ges,2} &= 40 \cdot 9 + 60 \cdot (0,7 \cdot 4,0 + 0,3 \cdot 6,5) = 360 + 60 \cdot (2,8 + 1,95) = 645 \\ NW_{ges,3} &= 40 \cdot 0 + 60 \cdot (0,7 \cdot 2,5 + 0,3 \cdot 3,0) = 0 + 60 \cdot (1,75 + 0,90) = 159 \\ NW_{ges,4} &= 40 \cdot 10 + 60 \cdot (0,7 \cdot 8,6 + 0,3 \cdot 5,9) = 400 + 60 \cdot (6,02 + 1,77) = 867 \end{aligned}$$

Aus den Gesamtnutzwerten lässt sich eine Rangfolge ableiten, die (rein rechnerisch) Aufschluss über die Vorteilhaftigkeit der möglichen Alternativen gibt. Damit ist eine erste Entscheidungsfindung möglich. Die Rangfolge wird für Wirtschaftlichkeit (Kosten-Erlös-Rechnung) und die Gebrauchseigenschaften (Nutzwertanalyse) separat abgebildet, um die beiden Hauptbestandteile der EWA gesondert auswerten zu können. Eine mögliche Alternative kann beispielsweise sehr gute Gebrauchseigenschaften, aber ein negatives Kosten-Erlös-Ergebnis aufweisen. Diese Alternative wäre von einem wirtschaftlich orientierten Unternehmen nicht tragbar und müsste ausgeschlossen werden.

Die Rangfolge des Gesamtnutzwertes kann trotzdem betrachtet werden, wenn nur ein einziges Ergebnis zur Beurteilung der Alternativen herangezogen werden soll. Dann sind wesentliche Eigenschaften jedoch nicht mehr eindeutig erkennbar. Diese Art der Beurteilung ist aus betriebswirtschaftlicher Sicht nicht ideal, kann aber für die volkswirtschaftliche Beurteilung, zum Beispiel durch politische Gremien, sinnvoll sein.

Nutzwertberechnung Beurteilungsgrößen	Gewichtung	Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
		fz	Nw	fz	Nw	fz	Nw	fz	Nw
Wirtschaftlichkeit $fz_w$	40%	0	0	9	360	0	0	10	400
Gebrauchseigenschaften EIU $fz_{EIU}$ EVU $fz_{EVU}$	60%								
		5,0	350	4,0	281	2,5	175	8,6	600
		6,7	201	6,5	196	3,0	90	5,9	176
$\Sigma$	100%		551		477		265		776
Gesamtnutzwert $NW_{ges}$			331		645		159		867

Rangfolge				
Wirtschaftlichkeit		3	2	3
Gebrauchseigenschaften		2	3	4
gesamt		3	2	4

Tabelle 10: Entscheidungsübersicht 2 — Die gewichteten Zielerreichungsgrade ergeben die Teilnutzwerte der Beurteilungsgrößen. Daraus lassen sich die Nutzwerte der Alternativen ableiten.

#### 4.4.4 Entscheidungsfindung

Die Entscheidung, welches der vier Szenarien gewählt werden soll, hängt in erster Linie davon ab, von wem die Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt wird. Aus Sicht des Eisenbahninfrastrukturunternehmens wird das Szenario MSTW zuerst ausscheiden, da es keinen positiven Ertrag liefert, einen Weiterbetrieb veralteter Technik darstellt und wenig innovativ ist. Die anderen drei Szenarien bieten gute Alternativen. Eine Auswahl muss aber in Abstimmung mit den Eisenbahnverkehrsunternehmen sowie anderen Entscheidungsträgern in Abhängigkeit von der prognostizierten Nachfrage erfolgen.

Für Eisenbahnverkehrsunternehmen bieten die Szenarien MSTW und ESTW gute Handlungsalternativen (geringe Fahrzeit, große Flexibilität), erfordern aber auch höhere Trassenpreiszahlungen. Das Szenario TuZ sollte auf Grund der inakzeptabel hohen Fahrzeit ausscheiden.

Eine dritte Gruppe interessierter Beteiligter sind Entscheidungsträger, z.B. regionale Aufgabenträger. Diese würden auf Basis von Ergebnissen von Nachfrageanalysen und –prognosen ein Szenario präferieren, welches die geringsten Zuschüsse erfordert.

## 5 Nutzung von Simulationsdaten in der Umlaufplanung

Mit der Verknüpfung der Eisenbahnbetriebssimulation und dem EWA-Tool wird es möglich, umfassende Berechnungen zur Beurteilung von Infrastruktur auf der Grundlage von Simulationsdaten durchzuführen. Für die Beurteilung bestimmter quantitativer Nutzenkriterien können Verknüpfungen mit anderen Software-Tools erforderlich sein. Das Kriterium *Umlauf der Fahrzeuge* lässt sich mit Hilfe der linearen Optimierung bewerten. Optimierte Fahrzeugumlaufpläne der jeweiligen Szenarien können somit erstellt werden. Nach [FREIBERGER und BUNDSCHUH 2004] bietet die Umlaufplanung neben der eigentlichen Fahrplangestaltung Potenzial zur Kostenreduktion im Personenverkehr der Deutschen Bahn.

Das hier erörterte Optimierungsproblem soll anknüpfend an Kapitel 4 verschiedene Infrastrukturvarianten vergleichen und Aufschluss darüber geben, welche Ausbau-

stufe einer betrachteten Relation für das Eisenbahnverkehrsunternehmen am Vorteilhaftesten erscheint. In Abhängigkeit der entstehenden Kosten wird gezeigt, dass die Varianten mit den wenigsten Umläufen nicht immer die kostengünstigste sein muss.

Die Berechnung der Fahrzeugumläufe ist auch für das Eisenbahninfrastrukturunternehmen interessant, da so die Nachfrage nach Trassen auf einer Strecke prognostiziert werden kann. Somit trägt die Umlaufplanung zur gesamtheitlichen Optimierung von ÖV-Systemen bei.

## 5.1 Grundlagen der Umlaufplanung

Als ein Teilschritt zur Optimierung von ÖV-Systemen dient die Umlaufplanung der ressourcensparenden Disposition der einzusetzenden Fahrzeuge. Ihr Ziel ist die Zuordnung von Linienfahrten zu Fahrzeugen. Dabei müssen alle vorher festgelegten Fahrten abgedeckt werden. Die Zahl der einzusetzenden Fahrzeuge soll jedoch möglichst gering bleiben, d.h. Leerfahrten sind zu vermeiden. [vgl. BECKER 2006, S. 2]

Es wird deutlich, dass der Umlaufplanung weitere Planungsschritte vorausgehen. Welche Fahrten zu absolvieren sind, wird im Vorfeld in der Fahrplanbildung festgelegt. Der Fahrplan wiederum basiert auf einem zuvor festgelegten Strecken- und Liniennetzplan. Auf Basis der Umlaufplanung erfolgen i.d.R. weitere Aufgaben, wie die Planung der Dienste des einzusetzenden Personals. Abbildung 20 verdeutlicht die Planungsschritte grafisch.

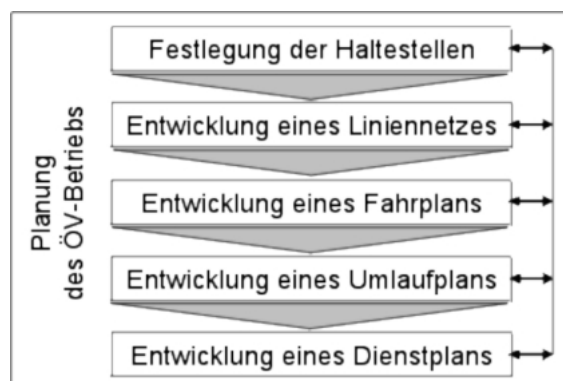


Abbildung 20: Planungsschritte in ÖV-Systemen, Quelle: [BECKER 2006, S. 2]

Um die Problematik der Umlaufplanung verständlich zu machen, seien an dieser Stelle einige wichtige Begriffe nach [HAASE 2007, S. 49] definiert:



**Depot:** Ort, von dem aus alle Fahrzeuge zu ihrer ersten planmäßigen Linienfahrt starten und zu dem sie am Ende des Umlaufes zurückkehren

**Leerfahrt:** Fahrt eines Fahrzeuges ohne Fahrgäste bzw. Güter, um das Fahrzeug an der Starthaltestelle einer Fahrt bereitzustellen

**Linienfahrt:** im Fahrplan festgeschriebene Fahrt von der Start- zur Endhaltestelle zur Beförderung von Personen bzw. zum Transport von Gütern

**kompatible Linienfahrt:** Eine Linienfahrt  $j$  ist mit ihrem Vorgänger  $i$  kompatibel, wenn ihr Startzeitpunkt größer oder gleich dem Endzeitpunkt von  $i$  plus evtl. Dauer einer Leerfahrt ist.

**Umlauf:** Umfasst alle Linienfahrten und Leerfahrten, die sequenziell von einem Fahrzeug absolviert werden können; Zahl der Umläufe  $\hat{=}$  Zahl der erforderlichen Fahrzeuge

**Wendezeit:** Zeit, die am Ende einer Linienfahrt notwendig ist, um das Fahrzeug auf die nächste Linienfahrt vorzubereiten (bspw. Reinigung, Umspannen des Triebfahrzeuges)

## 5.2 Modellierung mit Hilfe der linearen Optimierung

Zur Lösung des Problems der kostengünstigsten Infrastrukturvariante bietet sich die lineare Optimierung an. Dieses mathematische Hilfsmittel ermöglicht die Ermittlung des Maximums (bzw. Minimums) einer linearen Funktion unter Berücksichtigung von einschränkenden Bedingungen.

Im vorliegenden Fall werden an das Optimierungsproblem folgende Forderungen gestellt:

- Aus einer Menge von Infrastrukturvarianten soll diejenige ausgewählt werden, die alle fahrplanmäßig angegebenen Linienfahrten abdeckt und dabei die geringsten Kosten verursacht, d.h. die Zahl der einzusetzenden Fahrzeuge minimiert. Da mit der Beschaffung von Fahrzeugen „immense Beträge als Kapital“ [FREIBERGER und BUNDSCHUH 2004, S. 372] gebunden werden, stellt dies das Hauptziel der Optimierung dar.

- Die Fahrten, die in der Umlaufplanung absolviert werden müssen, werden durch Pfeile repräsentiert. Die Stationen werden durch Knoten dargestellt.
- Die Infrastrukturvarianten werden als parallel existierende Strecken zwischen den Stationen betrachtet. Die Belegung von mehr als einem Pfeil zwischen zwei Stationen ist jedoch unzulässig. Wird eine Infrastrukturvarianten ausgewählt, müssen alle Fahrten auf dieser Variante erfolgen.
- Jede Infrastrukturvariante kann eine unterschiedliche Reisezeit aufweisen. Da durch verschiedene Reisezeiten die Umläufe im Wesentlichen bestimmt werden, ist dies sogar essenziell wichtig.
- Da immer alle vorgegebenen Linienfahrten durchgeführt werden müssen, scheinen die Kosten dafür nicht entscheidungsrelevant. Sollen jedoch verschiedene Varianten verglichen werden, können die Kosten einer jeden Linienfahrt unterschiedlich hoch sein und müssen somit berücksichtigt werden.
- Jeder Umlauf wird zusätzlich mit einem Fixkostenblock belastet. Dieser symbolisiert die Kosten, die für das Vorhalten des Fahrzeuges (Kapitalkosten, Wartung usw.) erforderlich sind.
- Leerfahrten haben von Linienfahrten verschiedene Fahrzeiten, da keine Haltestellen angefahren werden. Die Leerfahrtkosten unterscheiden sich ebenfalls. Beides muss bei der Berechnung berücksichtigt werden.
- Ziel des Modells ist es, die Kosten für das Eisenbahnverkehrsunternehmen, d.h. die Zahl der erforderlichen Fahrzeuge zu minimieren. Mathematisch gesehen wird die Zahl der Fahrten je Fahrzeug maximiert.

Weitere Annahmen an das Modell:

- Der zugrundeliegende Fahrplan wurde in einem vorgelagerten Planungsschritt vom Eisenbahninfrastrukturunternehmen auf Basis nachgefragter Trassen erstellt und bestätigt. Demzufolge wird gefordert, dass die zu befahrenden Strecken zu den angegebenen Zeiten frei sind und keine Konflikte mit anderen Fahrten auftreten.

- Das Eisenbahninfrastrukturunternehmen rechnet wirtschaftlich und der zu zahlenden Trassenpreis (in den Kosten einer Fahrt enthalten) ist kostendeckend.
- Die zum Einsatz kommenden Schienenfahrzeuge sind mit der Streckenausrüstung kompatibel.

Im folgenden Abschnitt werden die wörtlich umschriebenen Forderungen an das Optimierungsproblem in ein mathematisches Modell überführt. Anschließend erfolgt die Umsetzung in einer Software zur linearen Optimierung.

### 5.2.1 Überführung in ein mathematisches Modell

Für das Modell sind zunächst Mengen, Parameter und Variablen zu definieren. Neben den Mengen aller Linienfahrten und Stationen sind auch Infrastrukturvarianten zu definieren. Für jede Fahrt wird eine Abfahrtszeit festgelegt. Die Linienfahrtzeit sowie die Kosten einer Linienfahrt hängen nur von der Infrastrukturvariante ab. Das bedeutet, dass alle Fahrtzeiten und Fahrtkosten gleich groß sind. Unter Berücksichtigung dieses Sachverhalts arbeitet das Modell nur korrekt, solange maximal eine Relation, d.h. zwei Stationen betrachtet werden.

Diese Einschränkung ist nicht so schwerwiegend, wie zunächst anzunehmen ist. Eisenbahninfrastrukturunternehmen schaffen Fahrzeuge oftmals für bestimmte Relationen an. Oft erfordert eine Strecke den Einsatz von Fahrzeugen mit besonderer Ausrüstung. Kleinere Unternehmen betreiben oftmals nur eine Strecke. Mit diesem Hintergrund müssen Fahrtzeit und Fahrtkosten nicht streckenabhängig betrachtet werden. In Kapitel 5.4 findet sich ein Ansatz zur Umgehung dieser Einschränkung.

Weiterhin setzt das Modell eine Wendezeit von 0 Minuten voraus. Auch dies stellt im Eisenbahnbetrieb kein Problem dar und ist in der Praxis durchaus üblich. Die Arbeitsweise des Modells wird im Struktogramm in Abbildung 21 dargestellt. Der Entwurf des Modells erfolgte in Anlehnung an [HAASE 2007, S. 49ff]. Es sei im Folgenden vollständig definiert:

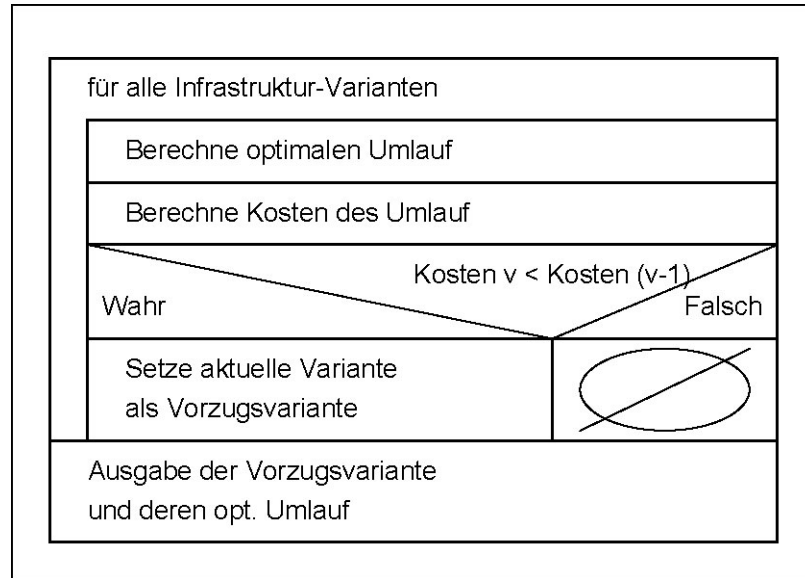


Abbildung 21: Struktogramm des Modells zur Umlaufplanung

### Mengen

$I$	Menge der Linienfahrten
$S$	Menge der Stationen
$V$	Menge der Infrastruktur-Varianten
$N_i$	Linienfahrten, die mit der Fahrt $i$ kompatibel sind (Nachfolger von $i$ )
$ss_i$	Startstation von Linienfahrt $i$
$es_i$	Endstation von Linienfahrt $i$

### Parameter

$ab_i$	Abfahrtszeit von Linienfahrt $i$
$fz_v$	Fahrzeit in der Variante $v$
$c_v$	Kosten einer Linienfahrt in der Variante $v$
$uk_v$	Fixkosten, die pro Umlauf in der Variante $v$ anfallen
$lfz_{s,s,v}$	Fahrzeit einer Leerfahrt von Station zu Station in Variante $v$
$lfc_{s,s,v}$	Kosten einer Leerfahrt von Station zu Station in Variante $v$

### Variablen

$x_{i,n}$	= 1, falls in einem Umlauf $n \in N_i$ direkt die Fahrt $i \in I$ bedient wird, 0 sonst
-----------	---

## Modell

$$\max F = \sum_{i \in I} \sum_{n \in N_i} x_{i,n} \quad \forall v \in V \quad (8)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{n \in N_i} x_{i,n} \leq 1 \quad i \in I \quad (9)$$

$$\sum_{i \in I | n \in N_i} x_{i,n} \leq 1 \quad n \in I \quad (10)$$

$$x_{i,n} \geq 0 \quad i \in I, n \in N_i \quad (11)$$

## Erläuterungen

- (8) maximiert die Anzahl der Verknüpfungen in jedem Umlauf.
- (9) gewährleistet, dass jede Linienfahrt maximal mit einer nachfolgenden kompatiblen Linienfahrt verknüpft werden darf (Zahl der Nachfolger  $\leq 1$ )
- (10) gewährleistet, dass jede Linienfahrt maximal mit einer vorgelagerten kompatiblen Linienfahrt verknüpft werden darf (Zahl der Vorgänger  $\leq 1$ )
- (11) legt den Wertebereich fest.
- $\{i \in I \mid n \in N_i\} = \text{Vorgängermenge von } n$ .

### 5.2.2 Umsetzung des Modells mit Hilfe von GAMS

Die Umsetzung komplexer Modelle erfolgt idealerweise computergestützt. Dadurch werden der manuelle Rechenaufwand und mögliche Fehlerquellen reduziert. Moderne Technik ermöglicht zudem eine schnelle und kostengünstige Bearbeitung. Insbesondere bei häufig wiederkehrenden Aufgaben ist eine Automatisierung sinnvoll.

Die Daten zur Umlaufplanung können teilweise aus dem EWA-Tool übernommen werden (Strecken, Fahrtzeiten), müssen teilweise aber auch manuell bearbeitet werden (Kostensätze). Abhängig von der Größe des betrachteten Strecken- und Liniennetzes wird das Programm zur Umlaufplanung mehrfach ausgeführt. Die Aufgabe wird also durch einen gewissen Wiederholungsaufwand charakterisiert.

Zur Umsetzung des Modells in einer Softwareumgebung eignet sich eine algebraische Modellierungssprache wie GAMS (General Algebraic Modeling System). Damit lassen sich lineare und ganzzahlige, aber auch nichtlineare, mathematische, stochastische, ökonomische und weitere Optimierungsprobleme lösen. [vgl. ROSENTHAL 2008, S. 163 ff] Es gibt eine Reihe alternativer algebraischer Modellierungssprachen zu GAMS, beispielsweise AMPL. Die Verwendung von GAMS bot sich für die Bearbeitung des Umlaufproblems an, da Vorkenntnisse vorhanden waren. Die Testversion ist kostenlos verfügbar und war für die Modellierung der Umlaufplanung ausreichend.

### 5.3 Anwendung an einem Beispiel

Im Folgenden sei das entwickelte Modell zur Umlaufplanung anhand eines Beispiels erläutert. Dabei wird in Anlehnung an Kapitel 4 eine Beispielstrecke definiert. Allerdings wird hier ein fiktives Streckenmodell mit ebenso vier Infrastrukturausbauvarianten eingeführt, welches die Funktionen des Modells besser demonstrieren kann, als die Beispielstrecke aus Kapitel 4. Gleichwohl wurde das Optimierungsmodell zur Berechnung des Umlaufs der Fahrzeuge (vgl. Kap. 4.4.1) erfolgreich eingesetzt.

Mit diesem fiktiven Streckenmodell werden drei Beispielrechnungen durchgeführt. Es seien zunächst die Eigenschaften festgelegt, die in allen vier Infrastrukturvarianten gleich sind:

- Alle Fahrten  $i$  finden auf einer Relation, d.h. zwischen zwei Stationen  $S = \{A, B\}$ , statt.
- Es finden Fahrten im Zehn-Minuten-Takt statt. In diesem Beispiel wird ein Zeitraum von einer Stunde als ein Ausschnitt aus einem Tagverlauf betrachtet. Somit werden sechs Fahrten pro Richtung und Stunde berücksichtigt. Ausgehend von einem definierten Zeitpunkt ( $t = 0$  min) werden die Abfahrtszeiten jeder Fahrt  $i$  im Parameter  $ab_i$  festgelegt. Alle Eigenschaften der Fahrten sind in Tabelle 11 zusammengefasst:

Fahrt $i$	Startstation $ss_i$	Endstation $es_i$	Abfahrtszeit $ab_i$ (min)
1	A	B	52
2	B	A	55
3	A	B	62
4	B	A	65
5	A	B	72
6	B	A	65
7	A	B	82
8	B	A	85
9	A	B	92
10	B	A	95
11	A	B	102
12	B	A	105

Tabelle 11: Eigenschaften der Fahrten im Streckenbeispiel

- Die Leerfahrten zwischen den beiden Stationen werden je Infrastrukturvariante wie folgt definiert:

$$\begin{aligned}
 l f z_{s,s,1} &= \begin{pmatrix} 0 & 30 \\ 30 & 0 \end{pmatrix} & l f z_{s,s,2} &= \begin{pmatrix} 0 & 25 \\ 25 & 0 \end{pmatrix} \\
 l f z_{s,s,3} &= \begin{pmatrix} 0 & 20 \\ 20 & 0 \end{pmatrix} & l f z_{s,s,4} &= \begin{pmatrix} 0 & 18 \\ 18 & 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

- Die Kosten der Leerfahrten zwischen den beiden Stationen müssen ebenfalls je Infrastrukturvariante definiert werden:

$$\begin{aligned}
 l f c_{s,s,1} &= \begin{pmatrix} 0 & 10 \\ 10 & 0 \end{pmatrix} & l f c_{s,s,2} &= \begin{pmatrix} 0 & 12 \\ 12 & 0 \end{pmatrix} \\
 l f c_{s,s,3} &= \begin{pmatrix} 0 & 14 \\ 14 & 0 \end{pmatrix} & l f c_{s,s,4} &= \begin{pmatrix} 0 & 16 \\ 16 & 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Weiterhin sind Parameter zu definieren, die in jeder der vier Variante unterschiedliche Ausprägungen aufweisen. Es werden insgesamt drei Durchgänge, d.h. drei voneinander unabhängige Beispiele, berechnet. Deshalb sind sämtliche Daten dreifach aufgeführt:

- Fahrzeit in Variante  $v$  in Minuten:  
Beispiel 1:  $fz_v = \{40, 30, 25, 20\}$   
Beispiel 2:  $fz_v = \{40, 30, 25, 20\}$   
Beispiel 3:  $fz_v = \{40, 30, 25, 20\}$
- Kosten einer Fahrt auf der Infrastrukturvariante  $v$  in Euro:  
Beispiel 1:  $c_v = \{10, 12, 14, 16\}$   
Beispiel 2:  $c_v = \{10, 20, 30, 40\}$   
Beispiel 3:  $c_v = \{10, 12, 14, 16\}$
- Fixkosten eines Umlaufs in Variante  $v$  in Euro:  
Beispiel 1:  $uk_v = \{50, 50, 50, 50\}$   
Beispiel 2:  $uk_v = \{30, 40, 50, 60\}$   
Beispiel 3:  $uk_v = \{40, 45, 45, 55\}$

Nach Eingabe aller Werte in GAMS können die Beispiele berechnet werden. Die Ausgabe des Ergebnisses — der Infrastrukturvariante, welche die geringsten Kosten verursacht — erfolgt durch GAMS in jeweils einer Textdatei. Die Ergebnisausgaben für die drei Beispiele wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit im Anhang D untergebracht. Für das erste Beispiel wird erkennbar, dass die Infrastrukturvariante 4 die geringsten Kosten und zwar in Höhe von 442 Euro verursacht. Diese setzen sich folgendermaßen zusammen:

$$\begin{array}{rcl} & 5 \text{ Umläufe} \cdot 50 \text{ Euro} & \\ + & 12 \text{ Fahrten} \cdot 16 \text{ Euro} & \\ + & 0 \text{ Leerfahrten} \cdot 16 \text{ Euro} & \\ \hline = & 250 \text{ Euro} + 192 \text{ Euro} & \\ = & 442 \text{ Euro} & \\ \hline \hline \end{array}$$

Die Betrachtung der Ergebnisse für die Beispiele 2 und 3 erfolgt analog. Die vorzuziehende Variante des zweiten Beispiels ist Infrastrukturvariante 1 mit neun Umläufen und Gesamtkosten von 390 Euro. Im Beispiel 3 wird mit Gesamtkosten von 438 Euro und sechs Umläufen der Infrastrukturvariante 3 der Vorzug gegeben.



## 5.4 Weiterführende Betrachtungen

Das in Kapitel 5.2 behandelte Modell weist eine Schwachstelle auf: Die Betrachtung von nur zwei Stationen. In der Praxis kann es aber vorkommen, dass Verstärkerfahrten mit kürzerem Zuglauf eingesetzt werden. Diese fahren nicht die ganze Relation zwischen zwei Stationen, sondern wenden in einer Station vor der Endstation, vgl. Abbildung 22.

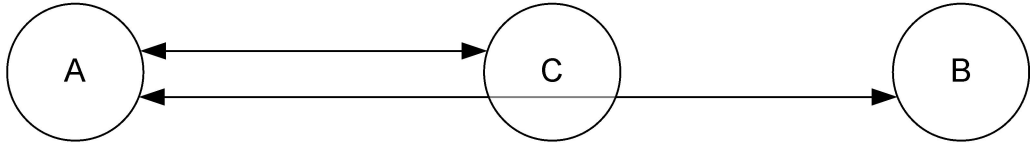


Abbildung 22: Zur Kompensierung hoher Nachfrage werden auf der Strecke  $\overline{AC}$  Verstärkerfahrten eingesetzt. Nicht alle Züge fahren bis Station  $B$ .

Um auch solche Fahrten abbilden zu können, wurde das Modell zur Umlaufplanung modifiziert, so dass mehr als zwei Stationen betrachtet werden können. Dazu waren Änderungen an zwei Parametern erforderlich. Die Kosten einer Fahrt sowie die Fahrzeit sind nun nicht nur von der Infrastrukturvariante, sondern auch von der Fahrt selbst abhängig und werden als  $c(i, v)$  bzw.  $fz(i, v)$  bezeichnet. Die vollständige Umsetzung des Modells in GAMS ist im Anhang E zu finden.

Um die Funktionsweise an einem Beispiel zu erläutern, werden die Daten aus dem Beispiel 3 des vorangegangenen Abschnittes verwendet. Die Menge der Fahrten wird um eine Fahrt erweitert. Bei  $t = 60$  min wird eine Fahrt von Station A nach C eingefügt, so dass nun 13 Fahrten absolviert werden müssen. Die übrigen Daten seien wie folgt gegeben:

$$\begin{aligned}
 fz_{i,v} &= \{40, 30, 25, 20\} & \forall i \in \overline{AB} \\
 fz_{i,v} &= \{20, 18, 15, 13\} & \forall i \in \overline{AC} \\
 c_{i,v} &= \{10, 12, 14, 16\} & \forall i \in \overline{AB} \\
 c_{i,v} &= \{5, 6, 7, 8\} & \forall i \in \overline{AC} \\
 uk_v &= \{40, 45, 45, 55\} \\
 lfz_{s,s,v} &= \{30, 25, 20, 18\} & \forall \{s, s\} \in \overline{AB} \\
 lfz_{s,s,v} &= \{18, 15, 13, 11\} & \forall \{s, s\} \in \{\overline{AC}, \overline{BC}\} \\
 lfc_{s,s,v} &= \{10, 12, 14, 16\} & \forall \{s, s\} \in \overline{AB}
 \end{aligned}$$

$$lfc_{s,s,v} = \{6, 7, 8, 9\} \quad \forall \{s, s\} \in \{\overline{AC}, \overline{BC}\}$$

Das vollständige Skript sowie die Ergebnisausgabe nach der Ausführung von GAMS ist in Anhang E zu finden. Als kostengünstigste Infrastrukturvariante wird hier Variante 3 mit sieben Umläufen und Gesamtkosten von 498 Euro ausgegeben.

$$\begin{aligned} & 7 \text{ Umläufe} \cdot 45 \text{ Euro} \\ + & 12 \text{ Fahrten} \cdot 14 \text{ Euro} \\ + & 1 \text{ Fahrt} \cdot 7 \text{ Euro} \\ + & 1 \text{ Leerfahrt} \cdot 8 \text{ Euro} \\ \hline = & 315 \text{ Euro} + 168 \text{ Euro} + 7 \text{ Euro} + 8 \text{ Euro} \\ = & 498 \text{ Euro} \\ \hline \hline \end{aligned}$$

## 5.5 Ergänzender Hinweis zu den Beispielen

Alle in den hier betrachteten Beispielen verwendeten Daten, insbesondere Kosten und Fahrzeiten wurden so gewählt, dass die Funktionen des Modells zur Umlaufplanung möglichst umfassend erklärt werden können. Sie entsprechen also nicht realen Werten.

Zur Wahrung der Übersichtlichkeit wurde nur eine geringe Zahl von Fahrten berücksichtigt. Es wurden Fahrten betrachtet, die im Zeitraum von einer Stunde beginnen. Dadurch entstehen viele Umläufe mit nur einer Fahrt. Ein einfaches Hochrechnen auf einen ganzen Betriebstag ist daher nicht möglich.

Das Modell wurde zur Berechnung der Umläufe für die in Kapitel 4 durchgeführte Wirtschaftlichkeitsanalyse verwendet und hat sich dort als gutes Hilfsmittel erwiesen.

# 6 Fazit zur erweiterten Wirtschaftlichkeitsanalyse von Eisenbahninfrastruktur

Das EWA-Tool unterstützt den Anwender bei seiner Aufgabe, der möglichst genauen Bewertung von Infrastrukturalternativen. Mit Hilfe von Tabellenwerten und Grafiken können Handlungsalternativen visualisiert und verglichen werden. Der Entscheider soll so bei der Beurteilung der am Besten geeigneten Variante so gut wie möglich

unterstützt werden. Hierbei muss eisenbahnspezifisches Fachwissen jedoch weiterhin verlangt werden. An vielen Stellen der Wirtschaftlichkeitsanalyse, insbesondere bei der Einschätzung von qualitativen Nutzenkriterien und der Gewichtung von Ergebnisgrößen, ist ein hohes Maß an Sorgfalt notwendig, die die Software dem Anwender nicht abnehmen kann.

Bisher erfolgen Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Eisenbahnbereich mit hohem, manuellem Aufwand. Das Zusammentragen der benötigten Informationen induziert eine Mehrfachdatenhaltung, die schwer aktuell zu halten ist. Mit dem EWA-Tool wird eine Möglichkeit geschaffen, Daten aus einer Eisenbahnbetriebssimulation für eine erweiterte Wirtschaftlichkeitsanalyse weiter zu verwenden. Eine Simulation des Fahrbetriebes wird im Rahmen der Planung neuer Maßnahmen ohnehin regelmäßig durchgeführt, so dass die Erstellung des Simulationsmodells keinen Mehraufwand darstellt. Mit Hilfe der XML-Spezifikation RailML, welche von einer Entwicklungspartnerschaft diverser Unternehmen und Einrichtungen hervorgebracht wird, können Daten aus der Simulationssoftware exportiert werden. Dabei sind drei Hauptbestandteile zu unterscheiden: infrastructure, rolling stock und timetable.

Die RailML-Daten werden projektbezogen in einer Datenbank gespeichert. Auf diese Datenbank greift eine Programmlogik zu, in welcher der Anwender die Daten ergänzen kann. Für die Berechnung der Lebenszykluskosten müssen zunächst globale Parameter wie Systemlebenszeit und Zinssätze, aber auch Kosten einzelner Elemente ergänzt werden. Die detaillierte Definition von Infrastruktur, Fahrzeugpark und Fahrplan ermöglicht anschließend die Berechnung von Trassenpreiseinnahmen. Diese fließen zusammen mit den Lebenszykluskosten in die Kosten-Erlös-Rechnung ein.

Aus der Betriebssimulation lassen sich weitere Größen ableiten, mit denen die Eigenschaften einer Investitionsmaßnahme genauer beschrieben werden können. Dabei sind insbesondere eine Vielzahl nichtmonetärer quantitativer sowie qualitativer Gebrauchseigenschaften von Interesse. Deren Bewertung wird in einer Nutzwertanalyse vorgenommen.

Sinnvollerweise werden mehrere Varianten einer Maßnahme geplant und berechnet. Dies ermöglicht den Vergleich und das Aufstellen einer Rangfolge, zum Einen bezüglich der Kosten-Erlös-Struktur und zum Anderen bezüglich der Gebrauchseigenschaften, unter den Handlungsalternativen.



## 7 Zusammenfassung & Ausblick

In der Diplomarbeit wurden Methoden der Wirtschaftlichkeitsanalyse hinsichtlich Ihrer Eignung zur Bewertung von Prozessen im Eisenbahnwesen untersucht. Es wurde damit die Grundlage für die Entwicklung einer Software geschaffen, mit deren Hilfe Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Eisenbahnbetrieb durchgeführt werden können. Dabei lag der Fokus auf einem ersten Teil, der Bewertung von Leit- und Sicherungstechnik.

Nach der Analyse der Besonderheiten des Eisenbahnwesens und der Definition zu betrachtender Bestandteile der Leit- und Sicherungstechnik konnten relevante Nutzenkriterien definiert werden. Hierbei wurde zunächst zwischen quantitativen monetären, quantitativen nichtmonetären sowie qualitativen Kriterien unterschieden. Im Rahmen der Kosten-Erlös-Rechnung und der Nutzwertanalyse wurden die Kriterien anhand von vier Szenarien auf Ihren Beitrag zur Bewertung der Leit- und Sicherungstechnik untersucht. Zusätzlich wurde dargestellt, wie die Handlungsabläufe im EWA-Tool umgesetzt werden sollen.

Die Ergebnisse aus dieser Diplomarbeit verhalfen zu einem Erkenntnisgewinn im Projekt Life-Cycle-Management. Zeitgleich mit der Entstehung der Diplomarbeit wurde mit der Entwicklung des EWA-Tools begonnen.

Mit dem aktuellen Stand ist die erweiterte Wirtschaftlichkeitsanalyse für Eisenbahnunternehmen durchführbar, beschränkt sich aber nur auf die Leit- und Sicherungstechnik und damit nur auf einen Teil der Eisenbahninfrastruktur. Für eine umfassendere Bewertung sind Erweiterungen erforderlich:

- Erweiterung um übrige Infrastruktur, insb. Oberbau
- Erweiterung um die Belange der EVU
  - Betrachtung des Rolling Stock
  - Betrachtung des Time Table
  - Definition entsprechender Nutzenkriterien
- Dokumentation und Bedienungsanleitung

Mit der Diplomarbeit wird eine Herangehensweise zur Untersuchung von Nutzenkriterien beschrieben. Sie kann damit als Leitfaden für die Erweiterung des EWA-Tools

um die Kriterien anderer Segmente des Eisenbahnbetriebes dienen. Für die Weiterentwicklung sind im Vorfeld wieder umfangreiche Planungen notwendig. Vor allem die Definition von Zielkriterien für die Bewertung von Rolling Stock und Time Table erfordert einen hohen Untersuchungsaufwand, der in dieser Arbeit noch nicht bewältigt werden konnte.

Die Ausführungen zur Umlaufplanung in dieser Arbeit haben gezeigt, dass die Einbindung weiterer Softwarelösungen sinnvoll ist. Eine automatisierte Übergabe der Daten ist derzeit nicht möglich, aber durchaus denkbar.

Es ist geplant, das EWA-Tool zunächst intern bei der Bearbeitung von Projekten am Institut für Verkehrssystemtechnik einzusetzen. Ob die Software auch bei anderen Anwendern, z.B. in Eisenbahnunternehmen einsetzbar ist, wird sich nach Fertigstellung der ersten Version und deren Test zeigen.

## Anhang

Anhang A	Ursache-Wirkungs-Kette .....	X
Anhang B	Glossar zu Elementen der Infrastruktur .....	XII
Anhang C	GAMS-Skript (1) .....	XV
Anhang D	Ergebnisse der Modellierung .....	XIX
Anhang E	GAMS-Skript (2) .....	XXII

## A Ursache-Wirkungs-Kette

Große Darstellung der Ursache-Wirkungs-Kette aus Abbildung 4



!!Seite rausnehmen und ersetzen!!

## B Glossar zu Elementen der Infrastruktur

Element	Erläuterung
Achszähler	Gerät zum Zählen von Achsen, die in einen Gleisabschnitt einlaufen bzw. ihn verlassen, um die Gleisbesetzung festzustellen. Achszähler werden paarweise an der Schiene montiert, damit die Fahrtrichtung der Schienenfahrzeuge in bzw. aus dem Zählabschnitt automatisch erkannt werden kann. [THIEL 2008]
Bahnübergangsanlagen	in Schienenhöhe liegende Kreuzung zwischen Eisenbahngleisen und Straßen, Wegen und Plätzen, wobei dem Schienenweg der Vorrang zusteht; man unterscheidet zwischen technisch gesicherten und technisch nicht gesicherten Bahnübergängen [THIEL 2008]k
Balise	elektronisches, im Gleis verbautes Modul zur Übertragung von Informationen an den Zug beim European Train Control System (ETCS)
Betriebssteuerung	Hierarchische organisierte Einrichtung zur Überwachung der Züge auf den Strecken hinsichtlich Regelmäßigkeit und Pünktlichkeit, Abfertigung in den Stationen usw. [vgl. THIEL 2008]
Blockanlage	Sicherungsanlage, bei der in einer Betriebsstelle Verschlüsse eintreten, die nur von einer anderen Betriebsstelle oder durch Mitwirkung des Zuges wieder aufgehoben werden können. [PACHL 2008]
Elektromechanisches Stellwerk (EMSTW)	Stellwerk, bei dem die Außenanlagen elektrisch gestellt und überwacht und die Abhängigkeiten zwischen den Hebeln durch ein mechanisches Verschlussregister bewirkt werden [PACHL 2008]
Elektronisches Stellwerk (ESTW)	rechnergesteuertes Stellwerk, dessen Funktions- und Sicherungslogik durch Software realisiert ist [PACHL 2008]

Element	Erläuterung
Fahrweg	Eine sich aus der Lage der Gleise und Weichen in der Gleistopologie ergebende Fahrmöglichkeit eines Schienenfahrzeugs. [PACHL 2008]
Gleisfreimeldeanlage	Sicherungsanlage, mit der das Freisein eines Gleisabschnitts von Fahrzeugen festgestellt werden kann (vgl. Achszähler, Gleisstromkreis) [PACHL 2008]
Gleissperre	Vorrichtung, die das Überfahren von Sperrsignalen gewaltsam verhindert, bestehend aus einem eisernen Sperrklotz, der die gefährdende Zugfahrt zum Entgleisen bringt
Gleisstromkreis	techn. Einrichtung zur Überprüfung, ob ein Gleisabschnitt belegt ist
Haltetafel	bei einfachen Verhältnissen anstelle eines Hauptsignals aufgestellte Signaltafel, die an einem Haltepunkt die Position markiert, an der bestimmte Züge zu halten haben
Hauptsignal	Signal, durch das im Regelbetrieb die Einfahrt eines Zuges in den auf das Signal folgenden Gleisabschnitt zugelassen wird. [PACHL 2008]
Kreuzung	Fahrwegelement, an dem sich zwei Gleise höhengleich kreuzen. [PACHL 2008]
Lineside Electronic Unit (LEU)	Zentrales Element der Streckenausrüstung mit ETCS zur Ermittlung des Signalbegriffs und Generierung der entsprechenden ETCS-Telegramme
Linienförmige Zugbeeinflussung (LZB)	Form der Zugbeeinflussung, bei der kontinuierlich Daten zum Zug übertragen werden [PACHL 2008]
Mechanisches Stellwerk (MSTW)	Stellwerk, bei dem die Außenanlagen über Drahtzug- oder Gestängeleitungen durch Muskelkraft gestellt werden [PACHL 2008]

Element	Erläuterung
Punktförmige Zugbeeinflussung (PZB)	Form der Zugbeeinflussung, bei der nur an diskreten Punkten Daten zum Zug übertragen werden [PACHL 2008]
Radio Block Center (RBC)	Streckenzentrale beim European Train Control System (ETCS) - übermittelt Daten zwischen dem Stellwerk und dem Fahrzeug
Relais-Stellwerk (RSTW)	Stellwerk, bei dem alle Abhängigkeiten durch Relaisschaltungen bewirkt werden [PACHL 2008]
Rückfallweiche	Weiche, die nicht in einem Stellwerk gestellt wird, sondern aufgefahren werden darf und durch eine Rückstellmechanik anschließend selbständig in die Ausgangslage läuft
Signal	optische, akustische oder elektrische Zeichen zur Übermittlung von Fahrerlaubnissen oder -verboten an den Triebfahrzeugführer [THIEL 2008]
Sperrsignal	Signal, das ein Fahrverbot [...] signalisieren kann [PACHL 2008]
Trapeztafel	bei einfachen Verhältnissen anstelle eines Hauptsignals aufgestellte Signaltafel, die die Stelle markiert, an der bestimmte Züge vor einer Betriebsstelle zu halten haben [PACHL 2008]
Vorsignal	Kündigt den Zustand des Hauptsignals an, um zu gewährleisten, dass der Zug rechtzeitig zum stehen kommt
Weiche	Fahrwegelement, an dem sich Gleise [...] verzweigen [PACHL 2008]
Weichenantrieb	Antriebsmaschine (i.d.R. elektrisch) zum Stellen einer Weiche
Zugbeeinflussung	Sicherungsanlage, durch die Daten über die zulässige Fahrweise vom Fahrweg zum Fahrzeug übertragen werden, um dort beim Abweichen von der erlaubten Fahrweise Schutzreaktionen (Zwangsbremungen) auszulösen. [PACHL 2008]
Zugleiter	Mitarbeiter, dem im Zugleitbetrieb die Fahrdienstleitung einer Strecke obliegt [PACHL 2008]

## C GAMS-Skript (1)

GAMS-Skript des behandelten Optimierungsproblems zur Umlaufplanung aus Kapitel 5 mit Daten aus dem Kapitel 5.3 behandelten Beispiel 1:

```

$title Ein-Depot-Umlaufplanung mit 4 Varianten
*Ausgabe der kostengünstigsten Var. und deren Umlauf
* Berücksichtigung aller x-Variablen
$offlisting

option
limrow = 19,
limcol = 45 ;
file out /Umlauf_2Stat_Bsp1.txt/;
put out;

set
  i      "Fahrten"          /1*12/
  s      "Stationen"        /A,B/
  v      "Infrastrukturvarianten" /1*4/
  n(i,i) "kompatible Nachfolger"

  ss(i,s) "Startstationen"
    / 1.A, 2.B, 3.A, 4.B, 5.A, 6.B, 7.A, 8.B, 9.A, 10.B, 11.A, 12.B /

  es(i,s) "Endstationen"
    / 1.B, 2.A, 3.B, 4.A, 5.B, 6.A, 7.B, 8.A, 9.B, 10.A, 11.B, 12.A /

alias(i,j); alias(s,st);

parameters
  ab(i)      "Abfahrtszeit (Start)"
    / 1   = 52
      2   = 55
      3   = 62
      4   = 65
      5   = 72
      6   = 75
      7   = 82
      8   = 85
      9   = 92
     10   = 95
     11   = 102
     12   = 105 /

  fz(v)      "Fahrzeit in Variante v"
    / 1   = 40
      2   = 30

```

```

3   = 25
4   = 20 /

```

```

c(v)      "Kosten einer Fahrt auf der Infra-Variante v"
/ 1   = 10
   2   = 12
   3   = 14
   4   = 16 /

```

```

uk(v)      "Fixkosten eines Umlaufs"
/ 1   = 50
   2   = 50
   3   = 50
   4   = 50 /

```

```

table lfz(s,s,v) "Leerfahrtzeit"
      1   2   3   4
A.A   0   0   0   0
A.B  30  25  20  18
B.A  30  25  20  18
B.B   0   0   0   0

```

```

table lfc(s,s,v) "Leerfahrtkosten einer Fahrt von s nach st in Variante v"
      1   2   3   4
A.A   0   0   0   0
A.B  10  12  14  16
B.A  10  12  14  16
B.B   0   0   0   0

```

```

positive variables
x(i,i)      "Zuordnungsvariable"
xx(i,i,v)   "Zuordnungsvariable zum Speichern"

```

```

variables
FF          "Anzahl Verknuepfungen"
B           "große Zahl"
MinGK       "Minimale Gesamtkosten"

```

```

equations
AnzVerknuepfung      Anzahl der Verknuepfungen
nachfolger(i)        maximal ein Nachfolger
vorgaenger(j)        maximal ein Vorgaenger;

```

```

AnzVerknuepfung..    sum((i,j)$n(i,j), x(i,j)) =e= FF;
nachfolger(i)..      sum(j$n(i,j), x(i,j)) =l= 1;
vorgaenger(j)..      sum(i$n(i,j), x(i,j)) =l= 1;

```

```

B.1 = 1000000 ;

```

```

model umlaufplan /all/;

parameters u(i,v)    "Ordnet Fahrt i einem Umlauf zu"
           gk(v)      "Gesamtkosten von v"
           z(v)       "Zahl der Umläufe + 1"
           k          "Laufparameter"
           r          "Zur Umrechnung von Minuten in Stunden"
           MinGKV     "Variante mit den min. Kosten"
           kumLFC(v)  "kummulierte Leerfahrtkosten in Variante v" ;

MinGK.l = B.l;
kumLFC(v) = 0;

loop(v,
    loop((i,j,s,st)$(es(i,s) and ss(j,st)),
        n(i,j) = ((ab(i)+fz(v)) + lfz(s,st,v) <= ab(j));
    );

    solve umlaufplan maximizing FF using lp;
    xx.l(i,j,v) = x.l(i,j) ;

    u(i,v) = 0;
    z(v) = 1;

* neuer Umlauf, falls Fahrt keinen Vorgaenger hat
    loop(j,
        if ( sum(i$n(i,j),xx.l(i,j,v)) = 0,
            u(j,v) = z(v);
            z(v) = z(v) + 1;
        );
    );

* Fahrt gehoert zum selben Umlauf wie Vorgaengerfahrt
    loop((i,j)$(n(i,j) and u(j,v) = 0 and xx.l(i,j,v)=1),
        u(j,v) = u(i,v);
    );

* Berechnet Leerfahrtkosten der Variante
    loop((i,j,s,st),
        if ((xx.l(i,j,v) > 0 and (ss(j,s)$es(i,st))),
            KumLFC(v) = KumLFC(v) + lfc(s,st,v);
        );
    );

display n
display x.l
display FF.l
display xx.l ;

```

```

*berechnet die Gesamtkosten aller Umlaeufe
  gk(v) = uk(v)*(z(v)-1) + sum(i, c(v)) + kumLFC(v);

* Waehlt die guenstigste Variante unter den bisher berechneten aus
  if(MinGK.1 > gk(v),
    MinGK.1 = gk(v) ;
    MinGKV = ord(v) ;
  );
);

  put 'Kostengünstigste Infrastrukturvariante:' MinGKV:2:0 /
  put 'Gesamtkosten: ' MinGK.1:6:2 ' Euro.' / ;
  put /
  put 'Details der Variante:'
  put /

loop(v$(ord(v)=MinGKV),
  for (k=1 to z(v)-1,
    put 'Umlauf ' k:3:0 ', Fixkosten: ' uk(v) ;
    put / ;
    put '-----'/;
    loop((i,s,st)$(u(i,v) = k and ss(i,s) and es(i,st) ),
      put 'Fahrt ' ord(i):2:0 ':' ;
      r = floor(ab(i)/60);
      put ' ab ' s.tl:1:0 ' um '
      put (4+r):2:0 ':' ;
      r = ab(i) - 60 * r;
      if ( r = 0, put '00'
      else put r:2:0);
      put ' Uhr ' ;
      put ' an ' st.tl:1:0 ' um ' ;
      r = floor((ab(i)+fz(v))/60);
      put (4+r):2:0 ':' ;
      r = (ab(i)+fz(v)) - 60 * r;
      if ( r = 0, put '00'
      else put r:2:0);
      put ' Uhr';
      put ', Kosten: ' ;
      put c(v):4:0 ;
      put ' Euro' /
    );
  put /
);
put /
);

```



## D Ergebnisse der Modellierung

Kostengünstigste Infrastrukturvariante: 4  
Gesamtkosten: 442.00 Euro.

Details der Variante:

Umlauf 1, Fixkosten: 50.00

```
-----
Fahrt 1: ab A um 4:52 Uhr an B um 5:12 Uhr, Kosten: 16 Euro
Fahrt 6: ab B um 5:15 Uhr an A um 5:35 Uhr, Kosten: 16 Euro
Fahrt 11: ab A um 5:42 Uhr an B um 6: 2 Uhr, Kosten: 16 Euro
```

Umlauf 2, Fixkosten: 50.00

```
-----
Fahrt 2: ab B um 4:55 Uhr an A um 5:15 Uhr, Kosten: 16 Euro
Fahrt 7: ab A um 5:22 Uhr an B um 5:42 Uhr, Kosten: 16 Euro
Fahrt 12: ab B um 5:45 Uhr an A um 6: 5 Uhr, Kosten: 16 Euro
```

Umlauf 3, Fixkosten: 50.00

```
-----
Fahrt 3: ab A um 5: 2 Uhr an B um 5:22 Uhr, Kosten: 16 Euro
Fahrt 8: ab B um 5:25 Uhr an A um 5:45 Uhr, Kosten: 16 Euro
```

Umlauf 4, Fixkosten: 50.00

```
-----
Fahrt 4: ab B um 5: 5 Uhr an A um 5:25 Uhr, Kosten: 16 Euro
Fahrt 9: ab A um 5:32 Uhr an B um 5:52 Uhr, Kosten: 16 Euro
```

Umlauf 5, Fixkosten: 50.00

```
-----
Fahrt 5: ab A um 5:12 Uhr an B um 5:32 Uhr, Kosten: 16 Euro
Fahrt 10: ab B um 5:35 Uhr an A um 5:55 Uhr, Kosten: 16 Euro
```

Abbildung 24: Ergebnisse der Umlaufplanung im Beispiel 1. Vorzugsvariante ist Infrastrukturvariante 4 mit Gesamtkosten von 442 Euro (im Betrachtungszeitraum).

Kostengünstigste Infrastrukturvariante: 1  
Gesamtkosten: 390.00 Euro.

Details der Variante:

Umlauf 1, Fixkosten: 30.00

Fahrt 1: ab A um 4:52 Uhr an B um 5:32 Uhr, Kosten: 10 Euro  
Fahrt 10: ab B um 5:35 Uhr an A um 6:15 Uhr, Kosten: 10 Euro

Umlauf 2, Fixkosten: 30.00

Fahrt 2: ab B um 4:55 Uhr an A um 5:35 Uhr, Kosten: 10 Euro  
Fahrt 11: ab A um 5:42 Uhr an B um 6:22 Uhr, Kosten: 10 Euro

Umlauf 3, Fixkosten: 30.00

Fahrt 3: ab A um 5: 2 Uhr an B um 5:42 Uhr, Kosten: 10 Euro  
Fahrt 12: ab B um 5:45 Uhr an A um 6:25 Uhr, Kosten: 10 Euro

Umlauf 4, Fixkosten: 30.00

Fahrt 4: ab B um 5: 5 Uhr an A um 5:45 Uhr, Kosten: 10 Euro

Umlauf 5, Fixkosten: 30.00

Fahrt 5: ab A um 5:12 Uhr an B um 5:52 Uhr, Kosten: 10 Euro

Umlauf 6, Fixkosten: 30.00

Fahrt 6: ab B um 5:15 Uhr an A um 5:55 Uhr, Kosten: 10 Euro

Umlauf 7, Fixkosten: 30.00

Fahrt 7: ab A um 5:22 Uhr an B um 6: 2 Uhr, Kosten: 10 Euro

Umlauf 8, Fixkosten: 30.00

Fahrt 8: ab B um 5:25 Uhr an A um 6: 5 Uhr, Kosten: 10 Euro

Umlauf 9, Fixkosten: 30.00

Fahrt 9: ab A um 5:32 Uhr an B um 6:12 Uhr, Kosten: 10 Euro

Abbildung 25: Ergebnisse der Umlaufplanung im Beispiel 2. Vorzugsvariante ist Infrastrukturvariante 1 mit Gesamtkosten von 390 Euro (im Betrachtungszeitraum).

Kostengünstigste Infrastrukturvariante: 3  
Gesamtkosten: 438.00 Euro.

Details der Variante:

Umlauf 1, Fixkosten: 45.00

Fahrt 1: ab A um 4:52 Uhr an B um 5:17 Uhr, Kosten: 14 Euro  
Fahrt 8: ab B um 5:25 Uhr an A um 5:50 Uhr, Kosten: 14 Euro

Umlauf 2, Fixkosten: 45.00

Fahrt 2: ab B um 4:55 Uhr an A um 5:20 Uhr, Kosten: 14 Euro  
Fahrt 7: ab A um 5:22 Uhr an B um 5:47 Uhr, Kosten: 14 Euro

Umlauf 3, Fixkosten: 45.00

Fahrt 3: ab A um 5: 2 Uhr an B um 5:27 Uhr, Kosten: 14 Euro  
Fahrt 10: ab B um 5:35 Uhr an A um 6:00 Uhr, Kosten: 14 Euro

Umlauf 4, Fixkosten: 45.00

Fahrt 4: ab B um 5: 5 Uhr an A um 5:30 Uhr, Kosten: 14 Euro  
Fahrt 9: ab A um 5:32 Uhr an B um 5:57 Uhr, Kosten: 14 Euro

Umlauf 5, Fixkosten: 45.00

Fahrt 5: ab A um 5:12 Uhr an B um 5:37 Uhr, Kosten: 14 Euro  
Fahrt 12: ab B um 5:45 Uhr an A um 6:10 Uhr, Kosten: 14 Euro

Umlauf 6, Fixkosten: 45.00

Fahrt 6: ab B um 5:15 Uhr an A um 5:40 Uhr, Kosten: 14 Euro  
Fahrt 11: ab A um 5:42 Uhr an B um 6: 7 Uhr, Kosten: 14 Euro

Abbildung 26: Ergebnisse der Umlaufplanung im Beispiel 3. Vorzugsvariante ist Infrastrukturvariante 3 mit Gesamtkosten von 438 Euro (im Betrachtungszeitraum).

## E GAMS-Skript (2)

Modifiziertes GAMS-Skript des Optimierungsproblems zur Umlaufplanung aus Kapitel 5 mit Beispieldaten:

```

$title Ein-Depot-Umlaufplanung mit 4 Varianten
* Ausgabe der kostengünstigsten Var. und deren Umlauf
* Berücksichtigung aller x-Variablen
* Betrachtung von 3 Stationen
$offlisting

option
limrow = 19,
limcol = 45 ;
file out /Umlauf_3Stat_Bsp1.txt/;
put out;

set
  i      "Fahrten"          /1*13/
  s      "Stationen"        /A,B,C/
  v      "Infrastrukturvarianten" /1*4/
  n(i,i) "kompatible Nachfolger"

  ss(i,s) "Startstationen"
    / 1.A, 2.B, 3.A, 4.A, 5.B, 6.A, 7.B, 8.A, 9.B, 10.A, 11.B, 12.A, 13.B /

  es(i,s) "Endstationen"
    / 1.B, 2.A, 3.C, 4.B, 5.A, 6.B, 7.A, 8.B, 9.A, 10.B, 11.A, 12.B, 13.A /

alias(i,j);
alias(s,st);

parameters
* Abfahrtszeiten muessen chronologisch eingegeben werden!
  ab(i)      "Abfahrtszeit (Start)"
    / 1  =  52
      2  =  55
      3  =  60
      4  =  62
      5  =  65
      6  =  72
      7  =  75
      8  =  82
      9  =  85
     10  =  92
     11  =  95
     12  = 102
     13  = 105  /

```

```
uk(v)          "Fixkosten eines Umlaufs"
```

```
/ 1   = 40
   2   = 45
   3   = 45
   4   = 55 /
```

```
table c(i,v)   "Kosten einer Fahrt i auf der Infra-Variante v"
```

	1	2	3	4
1	10	12	14	16
2	10	12	14	16
3	5	6	7	8
4	10	12	14	16
5	10	12	14	16
6	10	12	14	16
7	10	12	14	16
8	10	12	14	16
9	10	12	14	16
10	10	12	14	16
11	10	12	14	16
12	10	12	14	16
13	10	12	14	16

```
table fz(i,v)   "Fahrzeit von Fahrt i in Variante v"
```

	1	2	3	4
1	40	30	25	20
2	40	30	25	20
3	20	18	15	13
4	40	30	25	20
5	40	30	25	20
6	40	30	25	20
7	40	30	25	20
8	40	30	25	20
9	40	30	25	20
10	40	30	25	20
11	40	30	25	20
12	40	30	25	20
13	40	30	25	20

```
table LFZ(s,s,v) "Leerfahrtzeit"
```

	1	2	3	4
A.A	0	0	0	0
A.B	30	25	20	18
A.C	18	15	13	11
B.A	30	25	20	18
B.B	0	0	0	0
B.C	18	15	13	11
C.A	18	15	13	11
C.B	18	15	13	11

```

C.C    0    0    0    0

table LFC(s,s,v) "Leerfahrtkosten einer Fahrt von s nach st in Variante v"
      1    2    3    4
A.A    0    0    0    0
A.B   10   12   14   16
A.C    6    7    8    9
B.A   10   12   14   16
B.B    0    0    0    0
B.C    6    7    8    9
C.A    6    7    8    9
C.B    6    7    8    9
C.C    0    0    0    0

positive variables
x(i,i)                "Zuordnungsvariable"
xx(i,i,v)             "Zuordnungsvariable zum Speichern"

variables
FF                    "Anzahl Verknuepfungen"
B                      "große Zahl"
MinGK                 "Minimale Gesamtkosten"

equations
AnzVerknuepfung       Anzahl der Verknuepfungen
nachfolger(i)         maximal ein Nachfolger
vorgaenger(j)         maximal ein Vorgaenger;

AnzVerknuepfung..    sum((i,j)$n(i,j), x(i,j)) =e= FF;
nachfolger(i)..      sum(j$n(i,j), x(i,j)) =l= 1;
vorgaenger(j)..      sum(i$n(i,j), x(i,j)) =l= 1;

      B.1 = 1000000 ;

model umlaufplan /all/;

parameters u(i,v)     "Ordnnet Fahrt i einem Umlauf zu"
            gk(v)       "Gesamtkosten von v"
            z(v)        "Zahl der Umläufe + 1"
            k           "Laufparameter"
            r           "Zur Umrechnung von Minuten in Stunden"
            MinGKV      "Variante mit den min. Kosten"
            kumLFC(v)   "kummulierte Leerfahrtkosten in Variante v" ;

MinGK.1 = B.1;
kumLFC(v) = 0;

loop(v,
```

```

        loop((i,j,s,st)$(es(i,s) and ss(j,st)
                                and ((ab(i)+fz(i,v)) + lfz(st,s,v)) <= ab(j)),
            n(i,j) = 1 ;
*       if ((lfz(s,st,v)>0), kumLFC(v) = kumLFC(v) + LFC(s,st,v) );
        );

* loest das HP
        solve umlaufplan maximizing FF using lp;

* ordnet die berechneten Werte fuer x(i,j) der aktuell berechneten Variante zu
        xx.l(i,j,v) = x.l(i,j) ;

* Startwert fuer die Zahl der Fahrten in einem Umlauf
        u(i,v) = 0;

* Startwert fuer die Zahl der Umlaeufe
        z(v) = 1;

* neuer Umlauf, falls Fahrt keinen Vorgaenger hat
        loop(j,
            if ( sum(i$n(i,j),xx.l(i,j,v)) = 0,
                u(j,v) = z(v);
                z(v) = z(v) + 1;
            );
        );

* Fahrt gehoert zum selben Umlauf wie Vorgaengerfahrt
        loop((i,j)$(n(i,j) and u(j,v) = 0 and xx.l(i,j,v)=1),
            u(j,v) = u(i,v);
        );

* Berechnet Leerfahrtkosten der Variante
        loop((i,j,s,st),
            if ((xx.l(i,j,v) > 0 and (ss(j,s)$es(i,st))),
                KumLFC(v) = KumLFC(v) + lfc(s,st,v);
            );
        );

        display n
        display x.l
        display FF.l
        display xx.l
        display u ;

*berechnet die Gesamtkosten aller Umlaeufe
        gk(v) = uk(v)*(z(v)-1) + sum(i, c(i,v)) + kumLFC(v);

* Waehlt die guenstigste Variante unter den bisher berechneten aus

```

```

        if(MinGK.l > gk(v),
            MinGK.l = gk(v) ;
            MinGKV = ord(v) ;
        );
    );

* Ausgabe
    put 'Kostengünstigste Infrastrukturvariante:' MinGKV:2:0 /
    put 'Gesamtkosten: ' MinGK.l:6:2 ' Euro.' / ;
    put /
    put 'Details der Variante:'
    put /

loop(v$(ord(v)=MinGKV),
    for (k=1 to z(v)-1,
        put 'Umlauf ' k:3:0 ', Fixkosten: ' uk(v) ;
        put / ;
        put '-----'/;
        loop((i,s,st)$(u(i,v) = k and ss(i,s) and es(i,st) ),
            put 'Fahrt ' ord(i):2:0 ':' ;
            r = floor(ab(i)/60);
            put ' ab ' s.tl:1:0 ' um '
            put (4+r):2:0 ':' ;
            r = ab(i) - 60 * r;
            if ( r = 0, put '00'
            else put r:2:0);
            put ' Uhr ' ;
            put ' an ' st.tl:1:0 ' um ' ;
            r = floor((ab(i)+fz(i,v))/60);
            put (4+r):2:0 ':' ;
            r = (ab(i)+fz(i,v)) - 60 * r;
            if ( r = 0, put '00'
                else put r:2:0);
            put ' Uhr';
            put ', Kosten: ' ;
            put c(i,v):4:0 ;
            put ' Euro' /
        );
    put /
    );
    put /
);

```



Kostengünstigste Infrastrukturvariante: 3  
Gesamtkosten: 498.00 Euro.

Details der Variante:

Umlauf 1, Fixkosten: 45.00

Fahrt 1: ab A um 4:52 Uhr an B um 5:17 Uhr, Kosten: 14 Euro  
Fahrt 9: ab B um 5:25 Uhr an A um 5:50 Uhr, Kosten: 14 Euro

Umlauf 2, Fixkosten: 45.00

Fahrt 2: ab B um 4:55 Uhr an A um 5:20 Uhr, Kosten: 14 Euro  
Fahrt 8: ab A um 5:22 Uhr an B um 5:47 Uhr, Kosten: 14 Euro

Umlauf 3, Fixkosten: 45.00

Fahrt 3: ab A um 5:00 Uhr an C um 5:15 Uhr, Kosten: 7 Euro  
Fahrt 12: ab A um 5:42 Uhr an B um 6: 7 Uhr, Kosten: 14 Euro

Umlauf 4, Fixkosten: 45.00

Fahrt 4: ab A um 5: 2 Uhr an B um 5:27 Uhr, Kosten: 14 Euro  
Fahrt 11: ab B um 5:35 Uhr an A um 6:00 Uhr, Kosten: 14 Euro

Umlauf 5, Fixkosten: 45.00

Fahrt 5: ab B um 5: 5 Uhr an A um 5:30 Uhr, Kosten: 14 Euro  
Fahrt 10: ab A um 5:32 Uhr an B um 5:57 Uhr, Kosten: 14 Euro

Umlauf 6, Fixkosten: 45.00

Fahrt 6: ab A um 5:12 Uhr an B um 5:37 Uhr, Kosten: 14 Euro  
Fahrt 13: ab B um 5:45 Uhr an A um 6:10 Uhr, Kosten: 14 Euro

Umlauf 7, Fixkosten: 45.00

Fahrt 7: ab B um 5:15 Uhr an A um 5:40 Uhr, Kosten: 14 Euro

Abbildung 27: Ergebnisse der Umlaufplanung nach Modifikation im Beispiel 3. Vorzugsvariante ist Infrastrukturvariante 3 mit Gesamtkosten von 498 Euro (im Betrachtungszeitraum).

## Literatur

- [BECK 2007] BECK, KATJA (2007). LCC-Tool: Software zur Berechnung von Lebenszykluskosten von LST basierend auf MS Excel, DLR e.V., Institut für Verkehrsführung und Fahrzeugsteuerung, Braunschweig.
- [BECKER 2006] BECKER, JOSEF (2006). Umlaufplanung für den ÖV, in: <http://www.ivh.uni-hannover.de/optiv/Fallbsp/06-Umlauf/06-Umlauf/06-umlauf.pdf>, abgerufen am 15.Oktober 2008.
- [DB NETZ AG 2002] DB NETZ AG (2002). Konzernrichtlinie 413 – Bahnbetrieb, Infrastruktur gestalten, Streckenstandards, Fassung vom 01.01.2002.
- [DB NETZ AG 2005] DB NETZ AG (2005). Konzernrichtlinie 892 – LST-Anlagen montieren und instandhalten, Fassung vom 01.05.2005.
- [DB NETZ AG 2006] DB NETZ AG (2006). Konzernrichtlinie 408 – Züge fahren und rangieren, Fassung vom 30.06.2006.
- [DB NETZ AG 2007] DB NETZ AG (2007). Das Trassenpreissystem der DB Netz AG, veröffentlicht unter <http://www.db.de/fahrweg>, gültig vom 9. Dezember 2007 bis 13. Dezember 2008.
- [DB NETZ AG 2008] DB NETZ AG (2008). Kostenermittlungsbuch, Kostenrichtwertekatalog, Fassung vom 31.03.2008.
- [DIN 2005] DIN (2005). DIN EN 60300-3-3 Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 3-3: Anwendungsleitfaden – Lebenszykluskosten (IEC 60300-3-3:2004).
- [FREIBERGER und BUNDSCHUH 2004] FREIBERGER, KAI-UWE und BUNDSCHUH, MICHAEL (2004). Einsatzmöglichkeiten von Optimierungsverfahren in der Fahrzeugumlaufplanung der Deutschen Bahn AG. Eisenbahntechnische Rundschau, 53. Jg., Nr. 6, S. 371-375.
- [FRERICH und MÜLLER 2004] FRERICH, JOHANNES. und MÜLLER, GERNOT (2004). Europäische Verkehrspolitik : Von den Anfängen bis zur Osterweiterung der Europäischen Union. Oldenbourg, München.

- [HAASE 2007] HAASE, KNUT (2007). Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften, Vorlesungsunterlagen Leistungserstellung im öffentlichen Personenverkehr Sommersemester 2007.
- [HEMPE 2006] HEMPE, THOMAS (2006). Ein LCC-basiertes Verfahren zur Evaluierung von Schleifstrategien für Schienenbahnen. Eurailpress, Hamburg.
- [HOFFMEISTER 2000] HOFFMEISTER, WOLFGANG (2000). Investitionsrechnung und Nutzwertanalyse: Eine entscheidungsorientierte Darstellung mit vielen Beispielen und Übungen. Kohlhammer, Stuttgart u.a.
- [KNEWITZ 1994] KNEWITZ, RAINER (1994). Internationaler S+D-Kongress: Verfügbarkeit – Diagnose – Instandhaltung. Signal + Draht, 94. Jg., Nr. 12, S. 26-37(12).
- [LEIBBRAND 2007] LEIBBRAND, HANS (2007). Europas Zukunft: Betriebsleit-techniken. Eisenbahntechnische Rundschau, 57. Jg., Nr. 11, S. 659.
- [LIENAU 2007] LIENAU, CAY (2007). Abbildung von Infrastrukturkosten in der Eisenbahnbetriebssimulation. Dt. Verkehrs-Verl. Eurailpress, Hamburg.
- [MASCHEK 2007] MASCHEK, ULRICH (2007). Eisenbahnsicherungstechnik. In: FENDRICH, LOTHAR (Hrsg): Handbuch Eisenbahninfrastruktur, S. 599–648. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [PACHL 2004] PACHL, JÖRN (2004). Systemtechnik des Schienenverkehrs. Teubner, Stuttgart, 4., überarb. und erw. Aufl.
- [PACHL 2008] PACHL, JÖRN (2008). Glossar der Systemtechnik des Schienenverkehrs, in: <http://joernpachl.gmxhome.de/glossar.htm>, Stand vom 17. Juni 2008, abgerufen am 03. August 2008.
- [RAILXPPTS 2008] RAILXPPTS (2008). ETCS-Technologie. Schweizerische Bundesbahnen SBB, in: <http://www.etcs.eu/funktionsprinzip>, abgerufen am 23. Juli 2008.
- [ROSENTHAL 2008] ROSENTHAL, RICHARD E. (2008). GAMS — A User's Guide. GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA.

- [RUMPF 2007] RUMPF, CHRISTIANE (2007). FH Gelsenkirchen, Vorlesungsunterlagen: Management und Organisation von Verkehrsdienstleistungsbetrieben, in: <http://wirtschaftsrecht.fh-gelsenkirchen.de/FH-Sites/fachbereiche/uploads/media/>, abgerufen am 7. April 2008.
- [SCHEIER 2007] SCHEIER, BENEDIKT (2007). Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Eisenbahnsystemen anhand von Streckensimulationen am Beispiel einer Nebenstrecke. Diplomarbeit, Fachhochschule Braunschweig / Wolfenbüttel, Braunschweig.
- [SCHEIER und BÖHM 2008] SCHEIER, BENEDIKT und BÖHM, THOMAS (2008). Themenbeschreibung: Durchgängig softwaregestützte erweiterte Wirtschaftlichkeitsanalyse von Eisenbahnsystemen anhand von Betriebssimulation und Lebenszyklusrechnung, unveröffentlicht.
- [SCHEPPAN 2006] SCHEPPAN, MICHAEL (2006). Zugleitbetrieb für einfache betriebliche Verhältnisse. Eurailpress.
- [SCHILLING und LÜCKING 2003] SCHILLING, ROSEMARIE und LÜCKING, LARS (2003). Senkung der Lebenszykluskosten. EI-Eisenbahningenieur, 54. Jg., Nr. 5, S. 58-72.
- [SCHLENDER 2007] SCHLENDER, DIRK (2007). Bergische Universität Wuppertal, Leit- und Sicherungstechnik im Bahnbetrieb: Sicherheitstechnische Grundlagen, in: [http://wsvst25.site.uni-wuppertal.de/dirk/Labor\\_Stellwerke.pdf](http://wsvst25.site.uni-wuppertal.de/dirk/Labor_Stellwerke.pdf), abgerufen am 27. September 2008.
- [THIEL 2008] THIEL, PROF. DR.-ING. HANS-CHRISTOPH (2008). Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl Eisenbahn- und Straßenwesen, Ausgewählte Begriffe des Eisenbahn- und Verkehrswesens sowie der Fahrzeugtechnik, in: <http://www.verkehrswesen.tu-cottbus.de/fileadmin/eb/script/Skripte/0-6Begriffe.pdf>, abgerufen am 18. Juni 2008.
- [VEIT 2007] VEIT, PETER (2007). Instandhaltung und Anlagenmanagement. In: FENDRICH, LOTHAR (Hrsg): Handbuch Eisenbahninfrastruktur, S. 873–925. Springer–Verlag, Berlin, Heidelberg.

- [WIELAND 2006] WIELAND, BERNHARD (2006). Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften, Vorlesungsunterlagen Verkehrspolitik IV: Internationale Verkehrspolitik, Teil 1.
- [WÖHE und DÖRING 2002] WÖHE, GÜNTER und DÖRING, ULRICH (2002). Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. Vahlen, München, 21., neubearb. Auflage.
- [ZEBOLD 1996] ZEBOLD, CORNELIA (1996). Lebenszykluskostenrechnung. krp-Edition. Gabler, Wiesbaden.

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht. Ich bin mir bewusst, dass eine unwahre Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Dresden, 6. Januar 2009